

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Alternativní stanovení vlhkosti na mezi plasticity

Alternative Determination of Plastic Limit

Student:

Filip Vnenčák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Vnenčák**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: **Alternativní stanovení vlhkosti na mezi plasticity**
Alternative Determination of Plastic Limit
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- Rešerše metod používaných pro stanovení vlhkosti na mezi plasticity.
- Stanovení vlhkosti na mezi plasticity normovou metodou a jednou z metod popsanych v rešeršní části na vzorcích zemin s různým obsahem jílovité frakce.
- Srovnání výsledků měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

HEAD, K. H., 2006. *Manual of soil laboratory testing*. Third edition. Dunbeath: Whittles Publishing. ISBN 19-044-4536-5.
ŠIMEK, Jiří, 1990. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury. ISBN 80-03-00428-4.
MORENO-MAROTO, José Manuel a Jacinto ALONSO-AZCÁRATE. *An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test*. Applied Clay Science. 2015, 114, 497-508. DOI: 10.1016/j.clay.2015.06.037. ISSN 01691317.
BARNES, G. E. *An apparatus for the plastic limit and workability of soils*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering. 2009, 162(3), 175-185. DOI: 10.1680/geng.2009.162.3.175. ISSN 1353-2618.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Barbara Luňáčková, Ph.D.**

Datum zadání: 28.06.2019

Datum odevzdání: 29.11.2019

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Barbary Luňáčkové, Ph.D. a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

VNENČÁK, Filip. *Alternativní stanovení vlhkosti na mezi plasticity*. Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, 2019. 48 stran.

Tato bakalářská práce je zaměřena na stanovení meze plasticity, což je jedna ze tří základních konzistenčních mezí zemin. V práci jsou popsány čtyři metody stanovení meze plasticity včetně válečkové zkoušky, kterou předepisuje norma ČSN EN ISO 17892-12:2018. Dvě z těchto metod (válečková zkouška a tzv. ohybový test) byly použity k vyhodnocení vlhkosti na mezi plasticity v laboratorních podmínkách, a to na šesti vzorcích (směsích kaolinu a písku, přičemž každý vzorek pro tyto zkoušky obsahuje jiné množství kaolinu a písku). Nakonec tato práce srovnává výsledky zkoušek podle uvedených metod.

Klíčová slova: mez plasticity, válečková zkouška, ohybový test

Annotation

VNENČÁK, Filip. *Alternative Determination of Plastic Limit*. Bachelor thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2019. 48 pages.

This bachelor thesis is focused on determination of plastic limit which is one of the three basic consistency limits of soils. Four methods of determination of plasticity limit including thread rolling test prescribed by the norm ČSN EN ISO 17892-12: 2018 are described. Two of these methods (thread rolling test and so-called bending test) were used to evaluate the moisture at the plasticity limit in laboratory conditions on six samples (kaolin-sand mixtures, each sample containing different amounts of kaolin and sand). Finally, this work compares the test results according to these methods.

Keywords: plastic limit, thread rolling test, the thread bending test

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Metody stanovení vlhkosti na mezi plasticity zemin	2
2.1. Stanovení vlhkosti na mezi plasticity dle ČSN EN ISO 17892-12:2018	2
2.2. Ohybový test (The thread bending test)	5
2.3. Přístroj pro stanovení meze plasticity a zpracovatelnosti zemin podle G. E. Barnese.....	12
2.4. Stanovení vlhkosti na mezi plasticity pomocí kuželové zkoušky	20
3. Vlastní měření	24
3.1. Zeminy použité při experimentu	24
3.2. Vlhkost na mezi plasticity stanovená normovou metodou.....	28
3.3. Vlhkost na mezi plasticity stanovená ohybovým testem	30
4. Vyhodnocení výsledků.....	40
5. Závěr	44
6. Literatura.....	47

Seznam obrázků

Obrázek 1 Válečkovač (7).....	5
Obrázek 2 Provádění ohybového testu (7)	6
Obrázek 3 Detailní techniky provádění ohybového testu (7).....	7
Obrázek 4 Měření příliš ohebného vzorku (7)	7
Obrázek 5 Parabolický (a) a dvou-přímkový (b) graf (7)	8
Obrázek 6 Schématická klasifikace plasticity zemin (7).....	10
Obrázek 7 Schéma přístroje G. E. Barnese (6).....	12
Obrázek 8 Pohled na zařízení G. E. Barnese (6).....	13
Obrázek 9 Řez přístrojem G. E. Barnese (6).....	13
Obrázek 10 Vzorek zeminy připravený metodou G. E. Barnese (6).....	14
Obrázek 11 Vyhodnocení napětí versus průměr u vzorku podle G. E. Barnese (6)	17
Obrázek 12 Vyhodnocení napětí versus souhrnné deformace podle G. E. Barnese (6).....	17
Obrázek 13 Vyhodnocení práce vykonaná na jednotku objemu versus průměr podle G. E. Barnese (6)	18
Obrázek 14 Vyhodnocení práce vykonaná na jednotku objemu versus vlhkost podle G. E. Barnese (6)	19
Obrázek 15 Vztah mezi smykovou pevností a indexem tekutosti při kuželové zkoušce (9) ...	21
Obrázek 16 Idealizace vztahu mezi indexem tekutosti a smykové pevnosti podle kuželové zkoušky (9).....	22
Obrázek 17 Vztah mezi indexem tekutosti, vlhkostí a penetrací podle kuželové zkoušky (8)	22
Obrázek 18 Křivka zrnitosti písku	25
Obrázek 19 Příprava vzorku pro stanovení meze plasticity normovou metodou	28
Obrázek 20 Hodnoty vlhkosti na mezi plasticity stanovené normovou metodou.....	29
Obrázek 21 Příprava vzorku pro zkoušku ohybovým testem	30
Obrázek 22 Parabolická křivka, vzorek V1	31
Obrázek 23 Protínající se přímky, vzorek V1	32
Obrázek 24 Parabolická křivka, vzorek V2	33
Obrázek 25 Protínající se přímky, vzorek V2	33
Obrázek 26 Parabolická křivka, vzorek V3	34
Obrázek 27 Protínající se přímky, vzorek V3	35
Obrázek 28 Parabolická křivka, vzorek V4	36
Obrázek 29 Protínající se přímky, vzorek V4	36

Obrázek 30 Parabolická křivka, vzorek V5	37
Obrázek 31 Protínající se přímky, vzorek V5	38
Obrázek 32 Parabolická křivka, vzorek V6	39
Obrázek 33 Protínající se přímky, vzorek V6	39
Obrázek 34 Klasifikace doplňujících stavů u vzorků ohybovým testem	41
Obrázek 35 Porovnání doplňujících stavů pro vzorky	42
Obrázek 36 Porovnání vlhkostí na mezi plasticity zkoušených metod (Obsah kaolinu: V1 – 100 %, V2 – 95,2 %, V3 – 90,9 %, V4 – 87,0 %, V5 – 83,4 %, V6 – 76,9 %)	42
Obrázek 37 Grafické vyhodnocení této studie	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Technické parametry: Kaolin – mletý a sušený	24
Tabulka 2 Granulometrie písku	25
Tabulka 3 Popis a klasifikace zeminy	26
Tabulka 4 Procentuální zastoupení písku a kaolinu ve vzorcích V1 – V6	27
Tabulka 5 Hodnoty <i>PL</i> stanovené normovou metodou	29
Tabulka 6 Hodnoty vzorku V1 - stanovení ohybovým testem	31
Tabulka 7 Hodnoty vzorku V2 - stanovení ohybovým testem	32
Tabulka 8 Hodnoty vzorku V3 - stanovení ohybovým testem	34
Tabulka 9 Hodnoty vzorku V4 - stanovení ohybovým testem	35
Tabulka 10 Hodnoty vzorku V5 - stanovení ohybovým testem	37
Tabulka 11 Hodnoty vzorku V6 - stanovení ohybovým testem	38
Tabulka 12 Hodnoty stanové ohybovým testem	40

1. Úvod

Zeminy se vyskytují v různých konzistenčních stavech. Mezi jednotlivými konzistenčními stavy se vyskytují tzv. konzistenční meze (Atterbergovy meze) jak uvádí Jiří Šimek (1), což jsou vlhkosti, při kterých zemina přechází z jednoho stavu do druhého. Rozeznáváme tři konzistenční meze: vlhkost na mezi tekutosti (*LL*), vlhkost na mezi plasticity (*PL*) a vlhkost na mezi smrštění (*SL*).

Tato práce je zaměřena na možnosti stanovení vlhkosti na mezi plasticity zeminy (zkráceně meze plasticity), což je obsah vody, při kterém zemina přestane být plastická. Stanovení meze plasticity se provádí konvenčně pomocí válečkové metody popsané v ČSN EN ISO 17892-12:2018.

V práci je popsána zmíněná normová metoda a dále tři alternativní metody stanovení vlhkosti na mezi plasticity, a to takzvaný ohybový test (the thread bending test), Barnesův přístroj pro stanovení meze plasticity a zpracovatelnosti zemin a stanovení vlhkosti na mezi plasticity pomocí kuželové zkoušky. Zmíněné metody, kromě stanovení meze plasticity, dokážou stanovit i nové parametry, které konvenční metoda zjistit nedokáže. Společným znakem všech metod je snaha eliminovat vliv laboranta na vyhodnocení meze plasticity.

Pro laboratorní vyhodnocení meze plasticity byla použita normová metoda a ohybový test, a to pro šest různých vzorků. Tyto vzorky byly připraveny smícháním kaolinu a písku v různém poměru. Výsledkem je porovnání meze plasticity stanovené normovou metodou a ohybovým testem, stejně jako vyjádření nových parametrů, které se stanoví pomocí ohybového testu a jejich porovnání mezi všemi šesti vzorky použitými v tomto experimentu.

2. Metody stanovení vlhkosti na mezi plasticity zemin

2.1. Stanovení vlhkosti na mezi plasticity dle ČSN EN ISO 17892-12:2018

Stanovení vlhkosti na mezi plasticity zemin (*PL*) se řídí normou ČSN EN ISO 17892-12:2018 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity (2).

Tato norma upřesňuje metody pro stanovení meze plasticity a meze tekutosti zemin, dvě z Atterbergových mezí. Stanovení těchto mezí popisuje na vzorku zeminy, který neobsahuje zrna větší než 0,4 mm. Pokud jsou v zemině přítomna zrna větší než 0,4 mm, vyjádří se procentuálně zastoupení zrn menších než 0,4 mm (*K*) pomocí vztahu:

$$K = \frac{\left[\left(\frac{100 \times m_w}{100 + w} \right) - m_r \right]}{\left(\frac{100 \times m_w}{100 + w} \right)} \times 100\% \quad [1]$$

kde w – vlhkost reprezentativního vzorku v procentech

m_w – hmotnost nevysušené zeminy

m_r – hmotnost vysušené zeminy

Vlhkost na mezi plasticity se stanovuje tzv. válečkovou zkouškou, vlhkost na mezi tekutosti kuželovou nebo Casagrandeho zkouškou. Stanovení meze plasticity se obvykle provádí současně se stanovením meze tekutosti. Je-li to možné, doporučuje se provádět tyto zkoušky na vzorcích zeminy v přirozeném stavu. Nedoporučuje se zeminu předem vysoušet v sušičce a pokud tomu tak bylo, je potřeba tuto informaci uvést v protokolu o zkoušce (včetně teploty sušení). Během přípravy vzorku se zemina důkladně promíchá, aby se porušila její struktura a přidá se tolik vody, aby vznikla konzistence vhodná pro zkoušku. Pokud se do vzorku přidávala voda, je nutné ho ponechat po promíchání aspoň 4 hodiny „odpočívat“ (u vysoce plastických jílovitých zemin se doba odpočinku doporučuje alespoň 24 hodin). Poté je možné vzorek zkoušet.

Požadované vybavení pro stanovování meze plasticity:

- **Míchací destička:** musí být rovná, čistá, hladká a neobsahovat výrazné škrábance, které by ovlivnily chování vzorku během válení.

- **Tyč nebo měřidlo:** tyč o průměru mezi 3 mm a 3,5 mm, nebo měřidlo s otvorem stejné velikosti

Postup stanovení meze plasticity dle normy ČSN EN ISO 17892-12:2018 (2)

- **Vzorek** zeminy o hmotnosti 15 až 20 g, se položí na míchací destičku.
- Vzorek se nechá částečně vyschnout, dokud nebude dostatečně plastický, aby se dal vytvarovat do tvaru koule. Vzorek může být sušen volně při pokojové teplotě nebo jemným proudem teplého vzduchu.
- Koule se formuje mezi dlaněmi, dokud teplo rukou dostatečně nevysuší vzorek natolik, aby se na povrchu vzorku objevily drobné praskliny. Koule se poté rozdělí na 2 části o přibližně stejné hmotnosti.
- Každá část se rozdělí na 3 další dílčí části. Dílčí část se formuje do válečku o průměru asi 6 mm mezi palcem a ukazováčkem.
- Váleček se položí na mixovací destičku a rovnoměrným pohybem se válí dopředu a dozadu prsty jedné ruky od špičky prstu po druhý kloub. Udrží se rovnoměrný tlak směrem dolů, dokud se průměr válečku nepřiblíží 3 mm. Průměr se kontroluje měřidlem.
- Předchozí bod se opakuje, dokud se váleček nezačne rozpadat při průměru 3 mm. Správný konec testu nastává, když se váleček začne rozpadat, ne pouze praskat.
- Rozpadlé části se vloží do váženky a přikryjí víčkem.
- Postup se opakuje pro zbylé dílčí části, poté se zkouška opakuje pro druhou část (druhou půlku koule).
- Stanoví se vlhkost na obou vzorcích (jeden vzorek odpovídá jedné polokouli) podle ČSN EN ISO 17892-1 (3).
- Pokud ze vzorku zeminy nelze vyválet válečky o průměru 3 mm, je zemina považována za neplastickou.

Vlhkost se vyjádří pomocí vzorce:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \times 100 \quad [2]$$

kde w – vlhkost zeminy (%)

m_1 – hmotnost vysoušecí nádoby / váženky a vlhkého zkušební vzorku (g)

m_2 – hmotnost vysoušecí nádoby a suchého zkušební vzorku (g)

m_c – hmotnost vysoušecí nádoby (g)

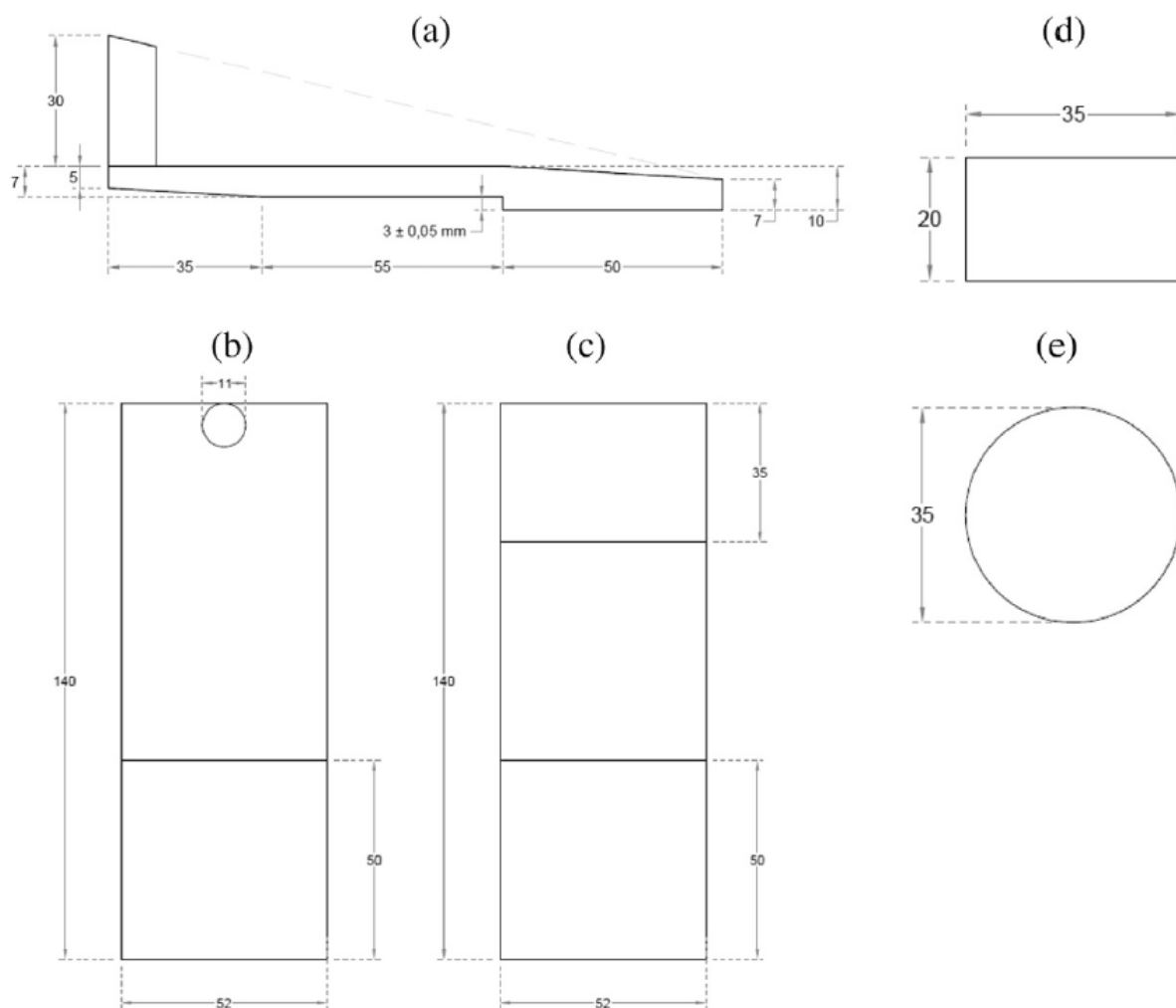
Mez plasticity PL se vypočítá jako průměrná vlhkost ze stanovení dvou mezí plasticity. Protokol o zkoušce musí potvrdit, že byl test proveden v souladu s touto normou.

Normová, válečková metoda se používá díky své jednoduchosti, snadné proveditelnosti, rychlosti a finanční nenáročnosti. Je ovšem kritizována za to, že v ní hraje značnou roli úsudek laboranta, který test provádí. Proto různé studie nabízí jiné metody, které se snaží omezit individuální vliv laboranta v testu a nahradit jej více objektivními postupy. Whyte (4) uvádí, že mnoho důležitých faktorů, jako aplikovaný tlak, tření nebo rychlost válení nejsou kontrolovány. Velikost a druh vzorku jsou podle Temyingyonga (5) dva hlavní faktory, které ovlivňují konečný výsledek zkoušky. Barnes (6) vytyká obtížnost posouzení stavu, při kterém se zemina rozpadá a chyby spojené s přípravou zeminy. Moreno Maroto (7) ve své studii srovnává hodnoty meze plasticity stanovené ohybovým testem s konvenční válečkovou zkouškou. Výsledky ohybového testu se lišily od válečkové zkoušky v rozmezí -3,8 až 3,2 %, přičemž průměrné hodnoty prováděné tímto testem vycházely lehce pod hodnotami normové zkoušky. Harison (8) porovnal hodnoty meze plasticity stanovené pomocí kuželové zkoušky s normovou metodou a uvádí průměrný rozdíl výsledků okolo 1,5 %. Barnes (6) uvádí, že mez plasticity stanovená konvenční metodou je vždy menší ve srovnání s mezí plasticity určenou jeho metodou. Ukázalo se, že důležitým faktorem rozdílných výsledků laborantů je nekonzistence při určování stavu, při kterém se zemina začne rozpadávat, takzvaný „koncový bod“. Dále také uvedl, že výsledky konvenční metody, zejména pro jílovité zeminy, často leží pod hranicí meze plasticity stanovené z křehko-plastického přechodu získaného podle Barnesovy metody. Předpokládá, že jiní laboranti také při použití metody ručního válcování získají různé hodnoty meze plasticity pro testované zeminy. Pro více jílovité zeminy byla mez plasticity stanovená přístrojem G. E. Barnese (6) vyšší než u meze plasticity stanovené konvenční metodou. U více hlinitých zemin nebo u zemin s vyšším obsahem písku byla mez plasticity stanovená Barnesovým přístrojem nižší než u konvenční metody.

2.2. Ohybový test (The thread bending test)

Ohybový test podle Moreno Maroto (7) je alternativní metodou stanovení vlhkosti na mezi plasticity, který umožňuje nejen získání meze plasticity, ale také dalších parametrů souvisejících s konzistencí zeminy.

Test se provádí tak, že se pomocí speciálně navržené pomůcky vytvoří váleček průměru 3 mm a ten se ohýbá tak dlouho, dokud nezačne praskat. Okamžik praskání je snadno určitelný. Test se opakuje pro různé vlhké vzorky. Na základě závislosti mezi mírou ohnutí a vlhkostí daného vzorku se stanoví mez plasticity. Snahou této metody je tedy eliminovat tu část válečkové zkoušky, kdy laborant musí rozhodnout, zda již dochází k rozpadání vzorku v okamžiku, kdy má vzorek průměr 3 mm, či ještě ne.

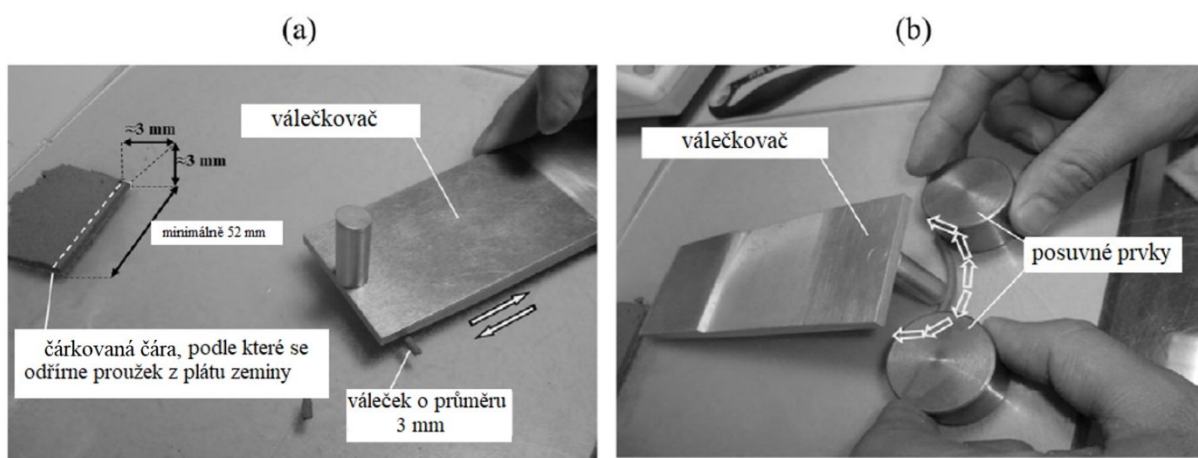


Obrázek 1 Válečkovač (7)

Postup zkoušky: test se provádí ze vzorku zeminy hmotnosti 30 až 40 g. Ze zeminy se ručně (nejlépe pomocí latexových rukavic, aby nedošlo ke změně vlhkosti) připraví na hladké skleněné desce plát zeminy tloušťky o trochu větší než 3 mm.

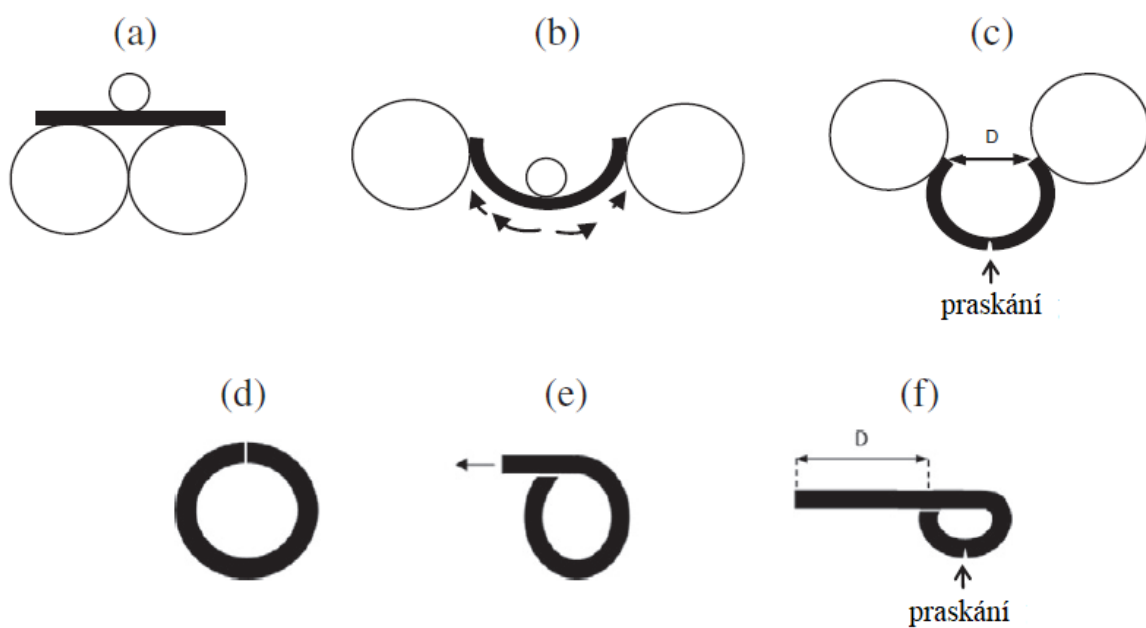
Poté se použije hliníkový nástroj navržený speciálně pro tento test, tzv. válečkovač (thread molder) [Obrázek 1] pro získání tloušťky plátu přesně 3 mm. Rozeklané okraje (které přesahují přes okraj válečkovače) 3 mm silného plátu zeminy se na krajích seříznou kovovou špachtlí a pak se uřízne proužek dlouhý alespoň 52 mm se čtvercovým řezem přibližně 3 x 3 mm. Z tohoto proužku se vyválí váleček o průměru přesně 3 mm pomocí válečkovače.

Válečkovač je vytvořen tak, že mezi jeho částí a skleněnou deskou je prostor přesně 3 mm. Válečkovač se posouvá rukou dopředu a dozadu až do okamžiku, kdy se původně čtvercový profil zeminy zakulatí [Obrázek 2a]. Váleček průměru 3 mm a délky 52 mm se potom na stejné skleněné desce ohýbá pomocí ocelových posuvných prvků kolem válcové části jako podpěrného bodu [Obrázek 2b]. Ohýbání se ukončí v okamžiku praskání válečku a hned se změří vzdálenost mezi konci válečku s přesností na 0,1 mm.

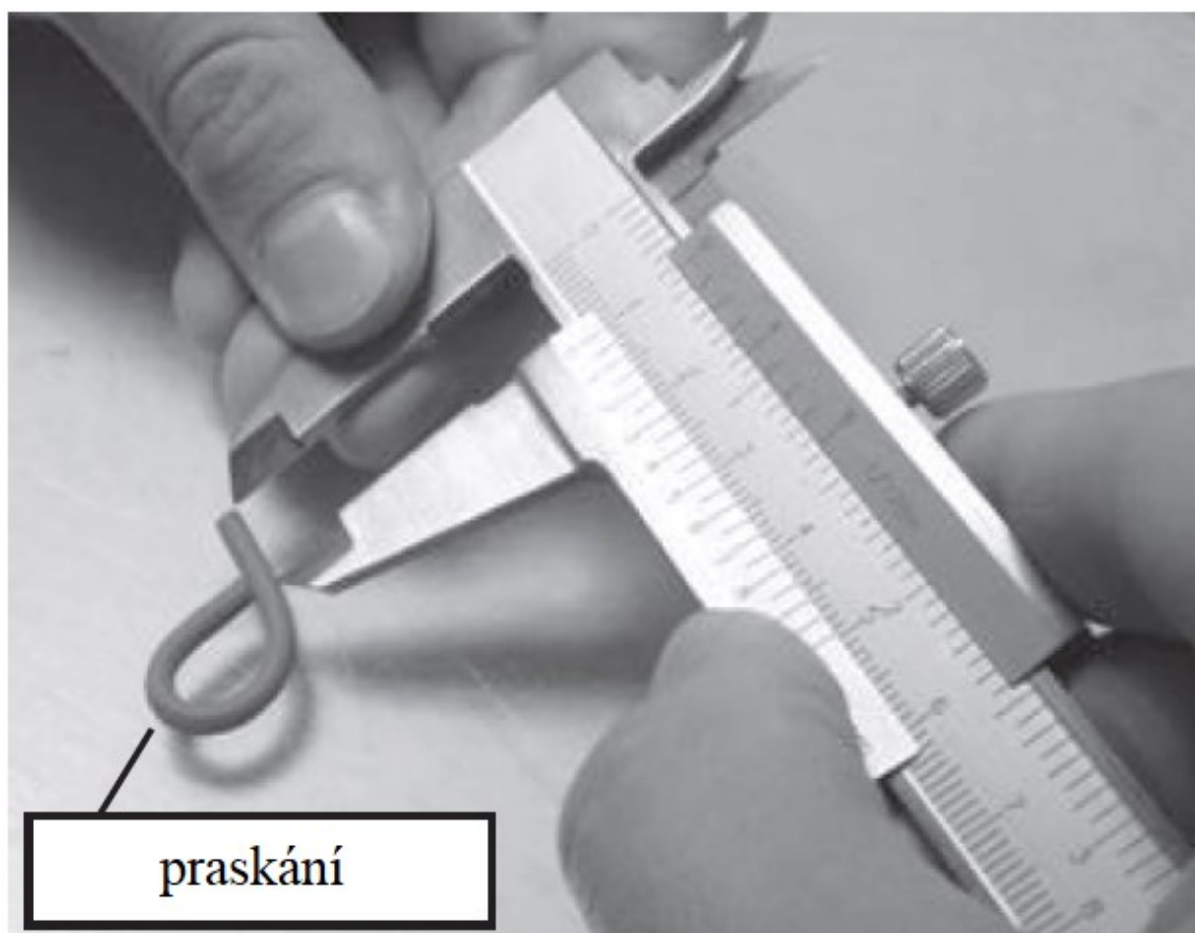


Obrázek 2 Provádění ohybového testu (7)

Toto měření se provádí mezi středními částmi konců válečku [Obrázek 3c]. Pokud je zemina příliš vlhká, mohou být výchyly tak velké, že se konce válečku dotknou [Obrázek 3d]. V tomto případě se váleček ohýbá ručně až do bodu praskání [Obrázek 3e], ale naměřená hodnota se v tomto případě zapisuje jako záporná [Obrázek 4]. Všechny tyto kroky se opakují pro alespoň dva další válečky.



Obrázek 3 Detailní techniky provádění ohybového testu (7)



Obrázek 4 Měření příliš ohebného vzorku (7)

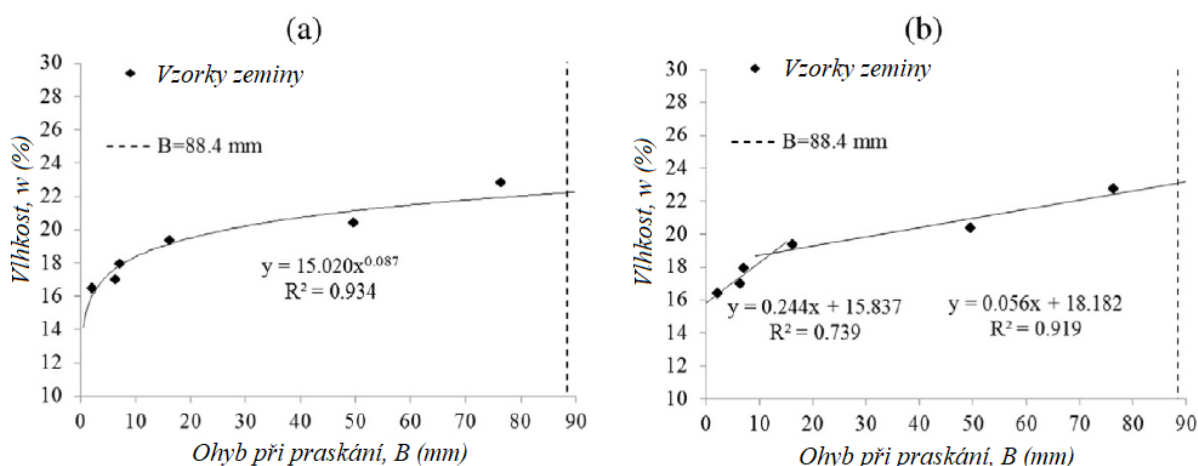
Pro vyhodnocení je nutné stanovit tzv. ohyb při praskání označený B pomocí rovnice:

$$B = 52,0 - D \quad [3]$$

kde D je průměrná vzdálenost měřená mezi vrcholy válečku v okamžiku, kdy váleček při ohýbání začne praskat a 52,0 odkazuje na délku válečku v mm. Hodnoty B , získané z rovnice [3] se vynášejí do grafu proti vlhkosti w . Korelaci bodů lze definovat dvěma způsoby, a to pomocí: parabolické křivky [Obrázek 5a] nebo pomocí dvou protínajících se přímek [Obrázek 5b]. Parabolická křivka je pojmenovaná ohybová křivka a její rovnice má tvar:

$$w = z \times (B^m) \quad [4]$$

kde, w je vlhkost, z je konstanta, B ohyb při praskání, vyjádřený v rovnici [3] a exponent m je tzv. ohybový sklon, který v logaritmicím vyjádření $\log B - \log w$ udává směrnici odpovídající přímkou.



Obrázek 5 Parabolický (a) a dvou-přímkový (b) graf (7)

Jak bylo uvedeno výše, uspořádání bodů může být také definováno dvěma přímkami s různými sklony, které se protínají ve společném bodě [Obrázek 5b]. Tento bod odpovídá vlhkosti, při které dochází ke změně konzistenčního stavu plastického měkkého na plastický tuhý. Nejstrmější linie odpovídá nižším hodnotám B a vlhkosti, ve kterých má zemina tuhou plastickou konzistenci a je dána rovnicí:

$$w = j_{stiff} * B + c_{stiff} \quad [5]$$

kde j_{stiff} určuje sklon tuho-plastické přímky, c_{stiff} je hodnota, kterou vytíná tuho-plastická linie na ose y . Druhá, méně strmá linie definuje rozsah vlhkosti, ve které je zemina v konzistenčním stavu plastickém měkkém a je zpracovatelná, aniž by byla lepkavá. Tato druhá přímka se nazývá měkce plastická přímka a je definovaná jako:

$$w = j_{soft} * B + c_{soft} \quad [6]$$

kde j_{soft} definuje sklon měkce-plastické přímky a c_{soft} je hodnota, kterou vytíná měkce plastická přímka na ose y . Uvedené tuho-plastické a měkce-plastické přímky jsou užitečnými nástroji pro stanovení mezí mezi různými stavy konzistence pomocí následujících parametrů:

Mez plasticity, PL : získá se jako vlhkost, která odpovídá ohybu $B = 0 \text{ mm}$, takže zemina není schopna odolávat deformacím pod tímto prahem (neplastický stav), ale snese je nad ním (plastický stav). PL je tedy vlhkost odpovídající meznímu bodu tuho-plastické linie s osou y , to znamená:

$$PL = c_{stiff} \quad [7]$$

Mez ohybu, BL : jedná se o nový parametr získaný z měkce-plastické přímky jako vlhkost w , odpovídající $B = 88,4 \text{ mm}$. Toto je mezní hodnota, nad kterou je váleček zeminy dostatečně měkký, aby se zcela ohnul bez zlomení. Zeminy při vlhkosti blíží se BL mají většinou měkkou a lepkavou konzistenci.

$$BL = j_{soft} * 88,4 + c_{soft} \quad [8]$$

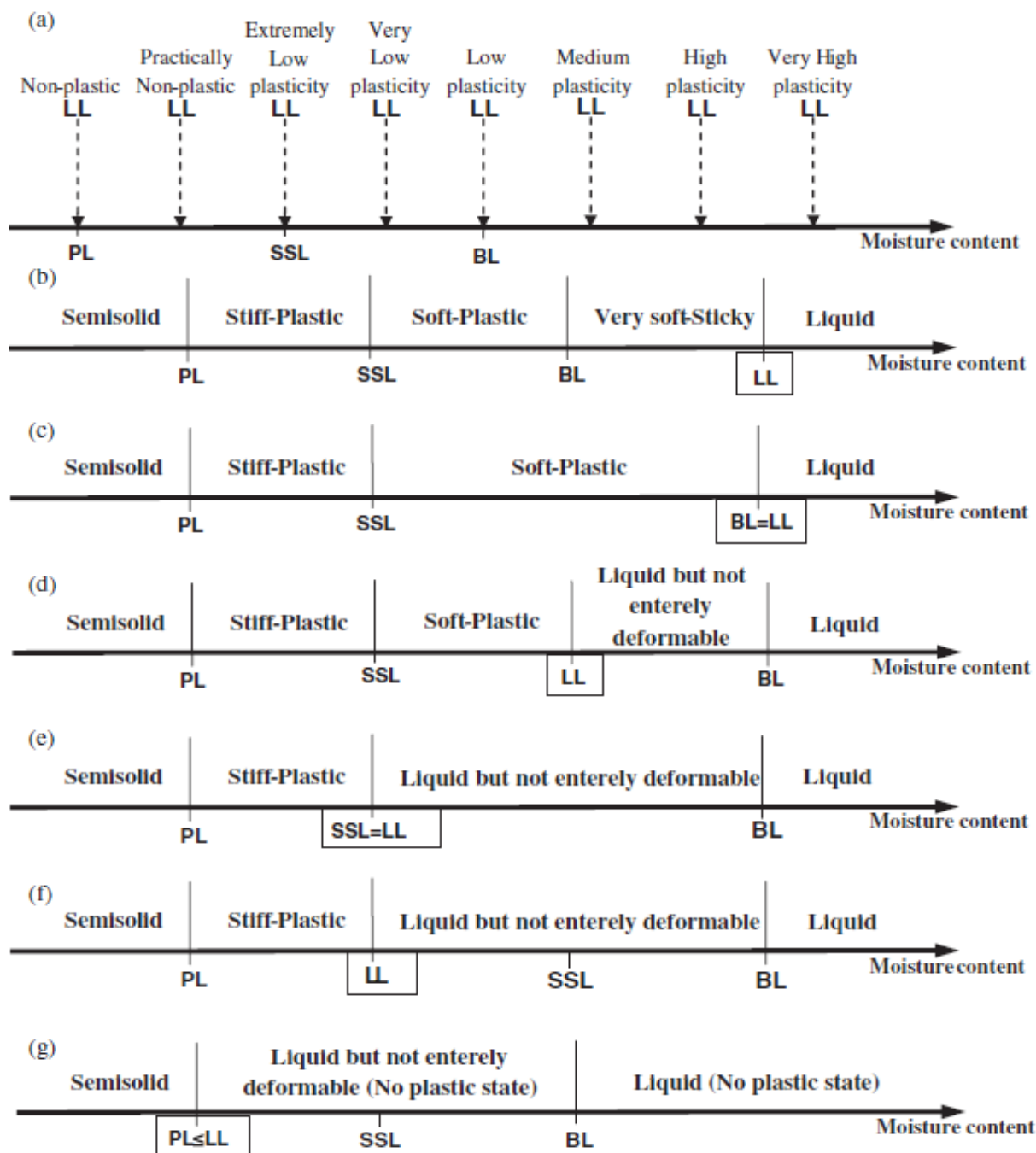
Tuho-měkká mez, SSL : je nový parametr definovaný jako vlhkost odpovídající průsečíku tuho-plastické přímky a měkce-plastické přímky. SSL označuje přechodový bod mezi stavy tuho-plastické a měkce-plastické konzistence a určuje se z rovnice:

$$SSL = j * B_{SS} + c \quad [9]$$

kde j je j_{stiff} nebo j_{soft} , c je c_{stiff} nebo c_{soft} a B_{SS} je ohyb při praskání, který je odvozen z rovnic [5] a [6], kdy $j_{stiff} * B_{SS} + c_{stiff} = j_{soft} * B_{SS} + c_{soft}$, kde se vyjádří B_{SS} jako:

$$B_{SS} = \frac{(c_{soft} - c_{stiff})}{(j_{stiff} - j_{soft})} \quad [10]$$

Kromě meze tekutosti, meze plasticity a polotuhých (křehkých) stavů, umožňují nové parametry *SSL* a *BL* vymezení dalších stavů konzistence soudržných zemin v jejich plastickém stavu, jako tuho-plastický stav (mezi *PL* a *SSL*), měkce plastický (mezi *SSL* a *BL*) nebo měkce lepkavý stav (mezi *BL* a *LL*) [Obrázek 6a].



Obrázek 6 Schématická klasifikace plasticity zemin (7)

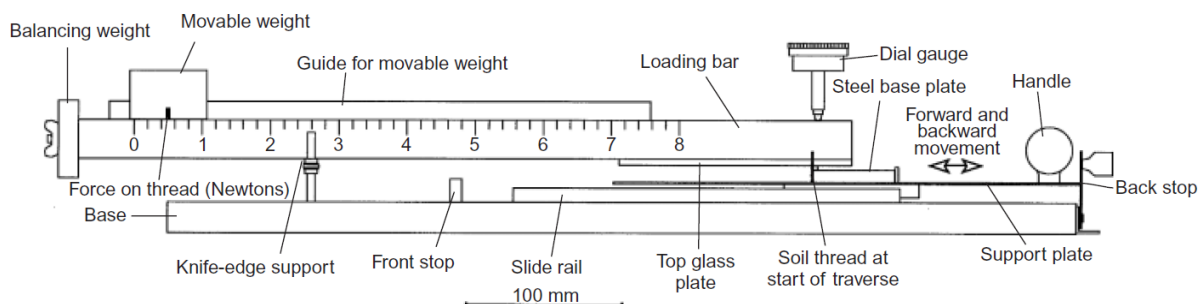
Nové parametry stanovené touto metodou umožňují identifikovat další stavy konzistence zemin, kromě typických vlhkostí na mezi tekutosti a plasticity, což bude užitečné v odvětvích jako keramický průmysl, zemědělství a geotechnické inženýrství.

Je zřejmé, že pro vyhodnocení meze plasticity ohybovou zkouškou je nutné znázornit závislost mezi ohybem B a vlhkostí w pomocí dvou lineárních přímk. Pokud se však stane, že je bodů pro toto vyhodnocení málo, je možné s pomocí rovnice ohybové křivky tyto body dopočítat (7).

2.3. Přístroj pro stanovení meze plasticity a zpracovatelnosti zemin podle G. E. Barnese

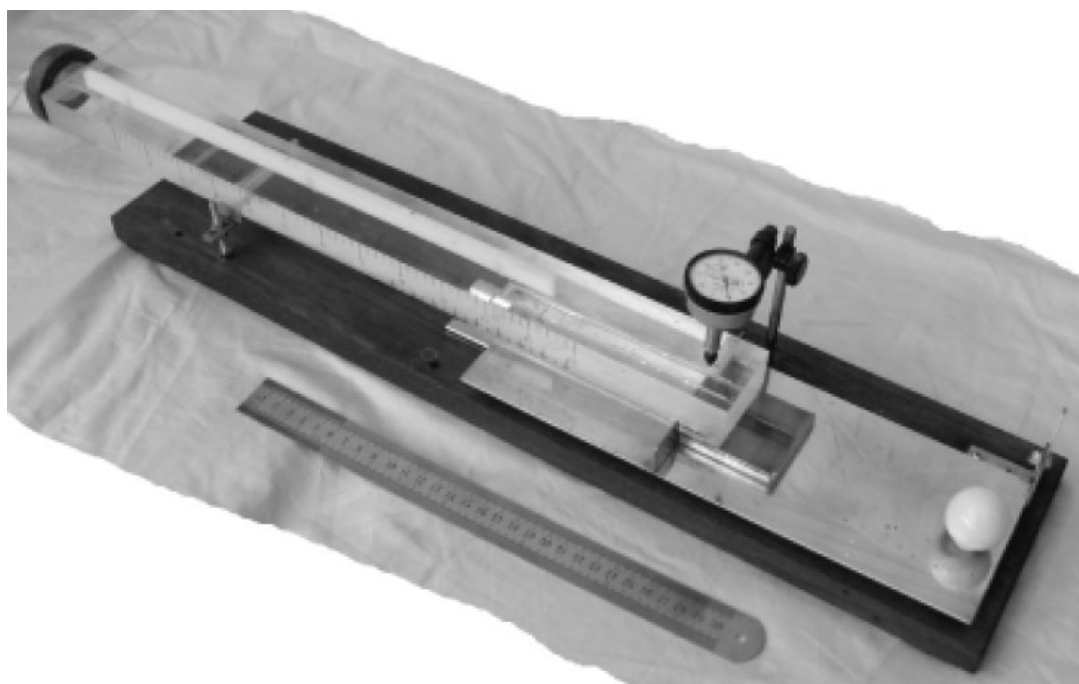
Další alternativní metodou stanovení meze plasticity je Barnesova metoda (6), která se snaží ještě více redukovat vliv laboranta na průběh zkoušky. Tato metoda se provádí tak, že s pomocí navrženého přístroje váleček o průměru 8 mm zmenšuje svůj průměr do velikosti asi 3 mm, při čem se postupně měří aplikovaná síla a průměr válečku mezi pohyby tohoto přístroje. Pomocí naměřených veličin se poté stanoví napětí, které se vynese do grafu se souhrnnými deformacemi, díky čemu se stanoví tuhost. Dále se vytvoří graf tuhosti versus vlhkosti, se kterým se definuje křehko-plastický přechod. Mez plasticity je stanovena jako průměr dvou hodnot nejbližší tomuto přechodu z obou stran.

Pro tento test G. E. Barnes (6) vymyslel a vyvinul zařízení, které vytváří váleček o průměru 3 mm nebo méně, s mnohem menším zásahem laboranta než při normové metodě. Válcovací zařízení kopíruje postup ručního válcování tak, že na váleček zeminy se vyvíjí napětí s cykly stlačování a napínání napříč průměrem. Prodloužení se vytvoří podélně. Váleček zeminy ve skutečnosti podléhá složitým procesům stlačování, napínání, kroucení a ohýbání. Váleček zeminy se válí mezi horní skleněnou deskou a spodní deskou z nerezové oceli. Obě desky jsou široké 50 mm. Zařízení je zobrazeno jako schéma [Obrázek 7] a fotografie [Obrázek 8].

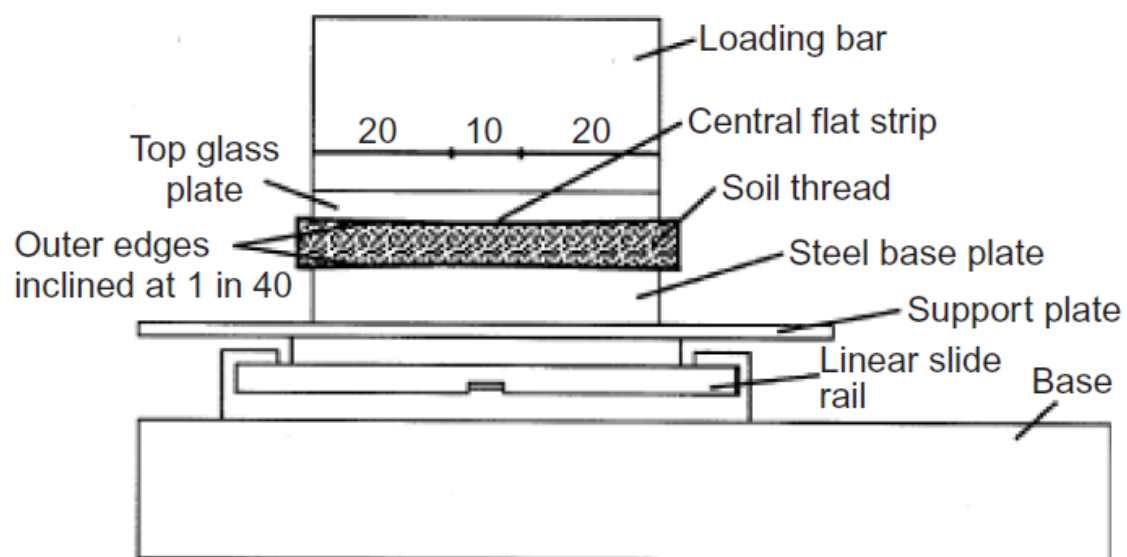


Obrázek 7 Schéma přístroje G. E. Barnese (6)

Prostřednictvím posuvné kolejnice je spodní deska tlačena dopředu do vzdálenosti 100 mm, přičemž je horní deska nehybná. Díky tomu se váleček posune dopředu o 50 mm. Poté se váleček vrátí zpět do své původní pozice. [Obrázek 9] zobrazuje konfiguraci desek tohoto přístroje.



Obrázek 8 Pohled na zařízení G. E. Barnese (6)

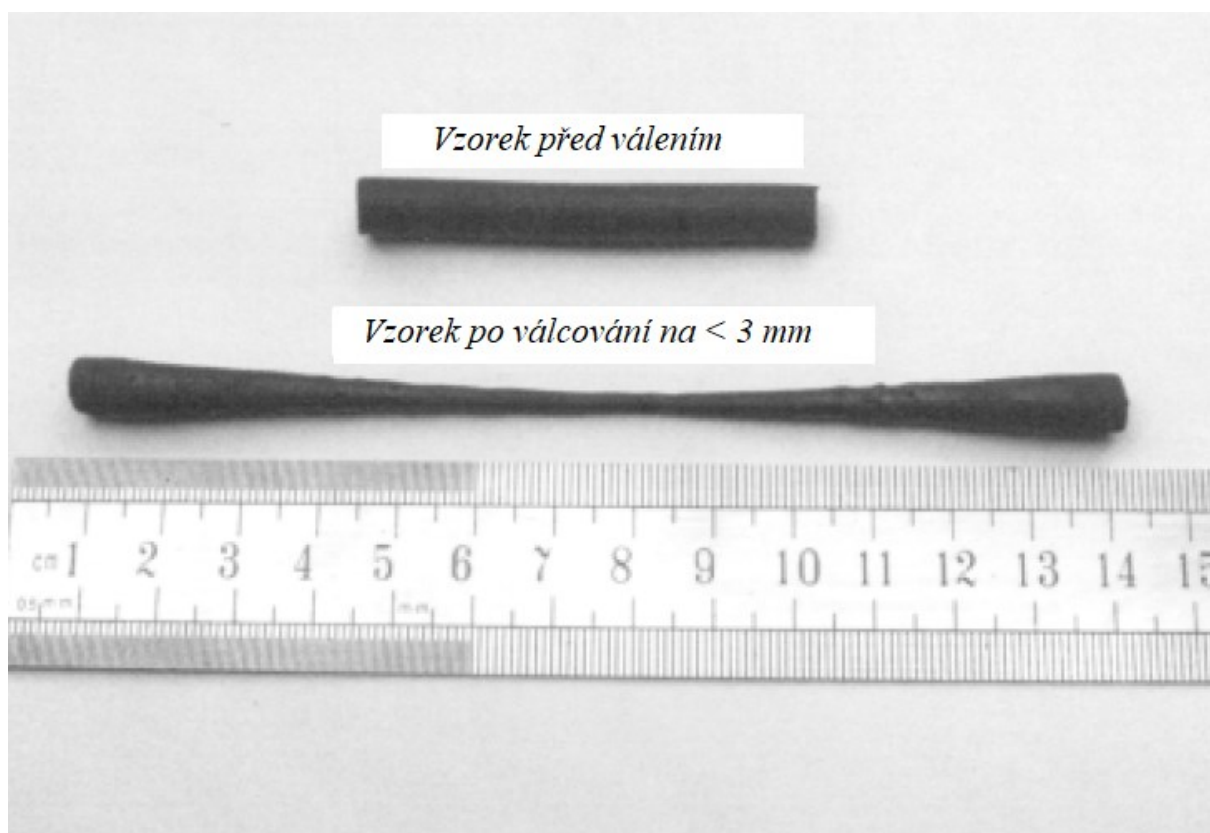


Obrázek 9 Řez přístrojem G. E. Barnese (6)

Během testu dochází ke třem zásadním problémům, které byly vyřešeny následujícím způsobem:

- **Prodlužování válečku:** aby se váleček správně prodlužoval podél své podélné osy, vnější okraje horní a spodní desky jsou mírně skloněny směrem ven v úhlu 1:40 nebo 0,5 mm na 20 mm.
- **Centralizace válečku:** zabránění tomu, že se váleček bude pohybovat do stran, ven ze zařízení, je v obou deskách vložen středový plochý pásek široký 10 mm.
- **Přilepování válečku na desky:** měkké, vlhké zeminy přilnou k povrchům, zejména ke sklu. Aby se toto minimalizovalo, na vnější plochy obou desek se aplikuje velmi tenký nátěr vazelíny.

Protože je nosná tyč vyrobena z průhledného polykarbonátu, chování válečku lze sledovat během válčení. Váleček použitý pro válčení přesahuje šířku desek (50 mm), aby se zajistilo, že mezi deskami vždy bude přítomna úplná délka válečku.



Obrázek 10 Vzorek zeminy připravený metodou G. E. Barnese (6)

Celý zkušební postup se provádí nejdříve se zeminou s vysokou vlhkostí. Nejvyšší přijatelná vlhkost má být pod „lepivým limitem“, aby nedošlo k ulpívání zeminy na zařízení. Vlhkost se snižuje, dokud není možné připravit váleček, který není lepivý. To znamená, že se nelepí na ruce, ani na desky přístroje. [Obrázek 10] zobrazuje typický zkušební vzorek před a po válcování na méně než 3 mm.

Přístroj je citlivější na přítomnost větších částic než při ručním válcování. Zrna větší než 0,425 mm, které nelze odstranit ručně, mohou mít nepřiměřený vliv na provedení zkoušky, zejména při válcování při menších průměrech. Proto je nezbytné, aby všechny zeminy, které jsou testovány, byly prosety za mokra, aby se odstranily částice větší než 0,425 mm.

Aby se zmenšil průměr válečku, musí být rovnoměrně namáhán stejně, jako při ručním válcování. Díky tomu, že nosnou tyč použijeme jako páku, umístí se nahoru pohyblivé závaží na vyznačených stupnicích, pro získání známé síly v Newtonech na váleček zeminy. Jak se váleček pohybuje po své dráze, aplikovaná síla se mění z P_{min} v počáteční poloze na P_{max} v konečné poloze. Integrací lze určit průměrnou sílu P_{ave} , což je hodnota síly vyznačená na nosné tyči. Nosná tyč je udržována v téměř horizontální poloze, díky čemuž je na váleček aplikovaná rovnoměrná síla.

Účelem tohoto zařízení je vytvořit prodloužení vzorku, zatímco je zemina v plastickém stavu a odvodit graf napětí versus deformace. Toho je dosaženo upravováním síly při každém posunu válečku tam a zpět (cyklu). Pokud je síla příliš velká, je riziko, že se váleček přetrhne a zkouška se přeruší. Pokud je aplikovaná síla příliš malá, váleček se protahuje a zmenšuje svůj průměr pomalu, takže je zapotřebí přílišného počtu cyklů.

Cílem zkoušky je vytvořit jednotný vztah mezi napětím a deformací, zatímco se zemina pohybuje mezi průměry 6 až 3 mm. V kterékoli fázi válcování, může být posuv zpět prováděn se stejnou silou. Pokud se změna průměru válečku zmenší oproti předchozímu cyklu (váleček zmenšuje svůj průměr pomaleji oproti předchozímu cyklu), může se síla zvýšit pro další cyklus, protože došlo ke zpevnění napětím. Pokud se od předchozího cyklu změna v průměru zvětší (váleček zmenšuje svůj průměr rychleji oproti předchozímu cyklu), může být používaná síla udržována, za předpokladu, že změny v průměru vzorku zůstanou v požadovaném rozsahu. Pokud změna průměru překročí požadovaný rozsah, síla se sníží.

Průměr válečku se po každém cyklu stanoví pomocí číselníkového měřidla, nacházející se nad nosnou tyčí nad počáteční polohou válečku zeminy. Ukazatel číselníku je vynulován měřením, když je mezi desky vložena kovová tyč o průměru 3 mm. Z naměřených hodnot lze určit radiální napětí pro každý posuv. Jak se průměr válečku mění ve své délce v závislosti na uspořádání desek, lze určit buď radiální napětí ve střední části válečku, nebo průměrnou hodnotu radiálního napětí po celé délce vzorku. Tyto dvě hodnoty spolu přímo souvisí, takže se pro jednoduchost použije napětí prvně uvedené, protože dává hodnotu v maximu.

Napětí ve vzorku zeminy se stanoví ze vzorce:

$$\sigma = \frac{k \times P}{L \times d} \quad [11]$$

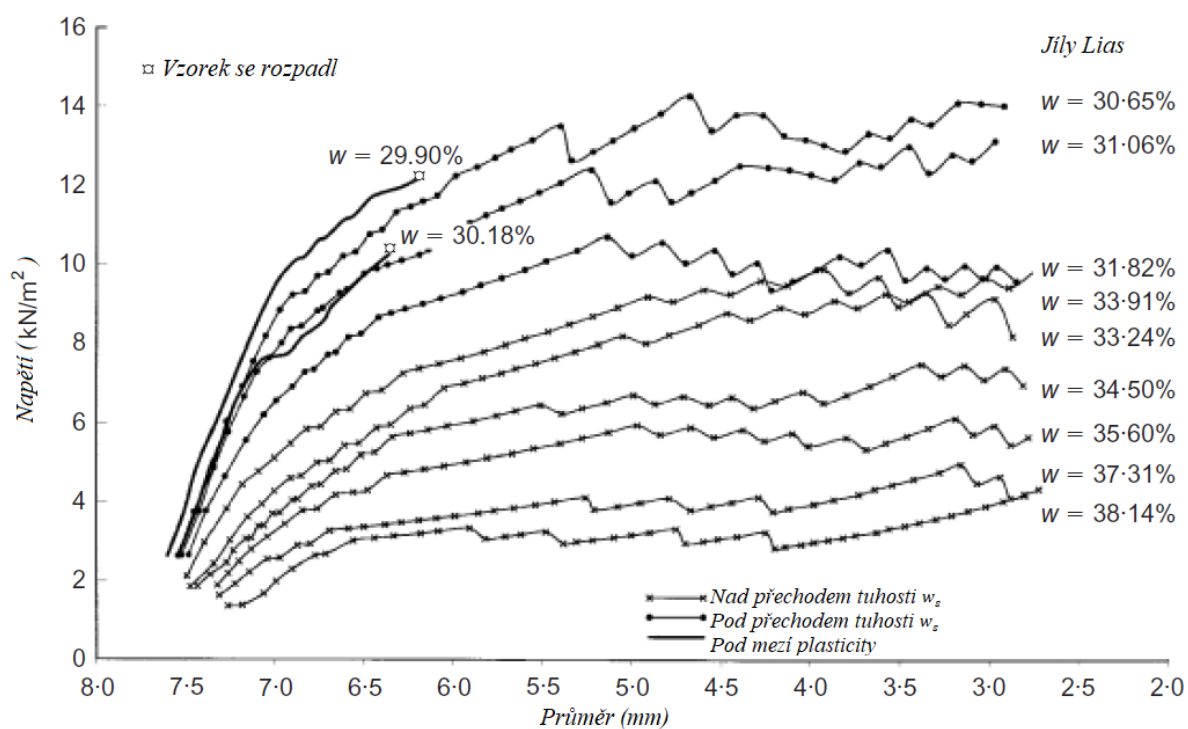
kde L je délka válečku mezi deskami, v tomto případě 50 mm, d je průměr, měřený, jak bylo popsáno výše a P je síla aplikovaná v Newtonech. Bylo zjištěno, že tento vzorec se dá aplikovat pro vzorky zemin v mezi plasticity s $k = -2/\pi$ pro tahové napětí na zatěžovaném průměru a $k = 6/\pi$ pro maximální tlakové napětí kolmo na průměr.

Protože se však tahová a tlaková napětí během válcování mění, a je možné, že se budou lišit pro plastický a elastický materiál, pro který byl tento vzorec odvozen, není konstanta k pro plastický materiál známa. Protože výsledky testu nejsou absolutní hodnoty a předpokládá se, že nejsou závislé na této konstantě, se pro jednoduchost přijala hodnota $k = 1$ a vypočtené napětí ve vzorku je určeno jako orientační hodnota z rovnice:

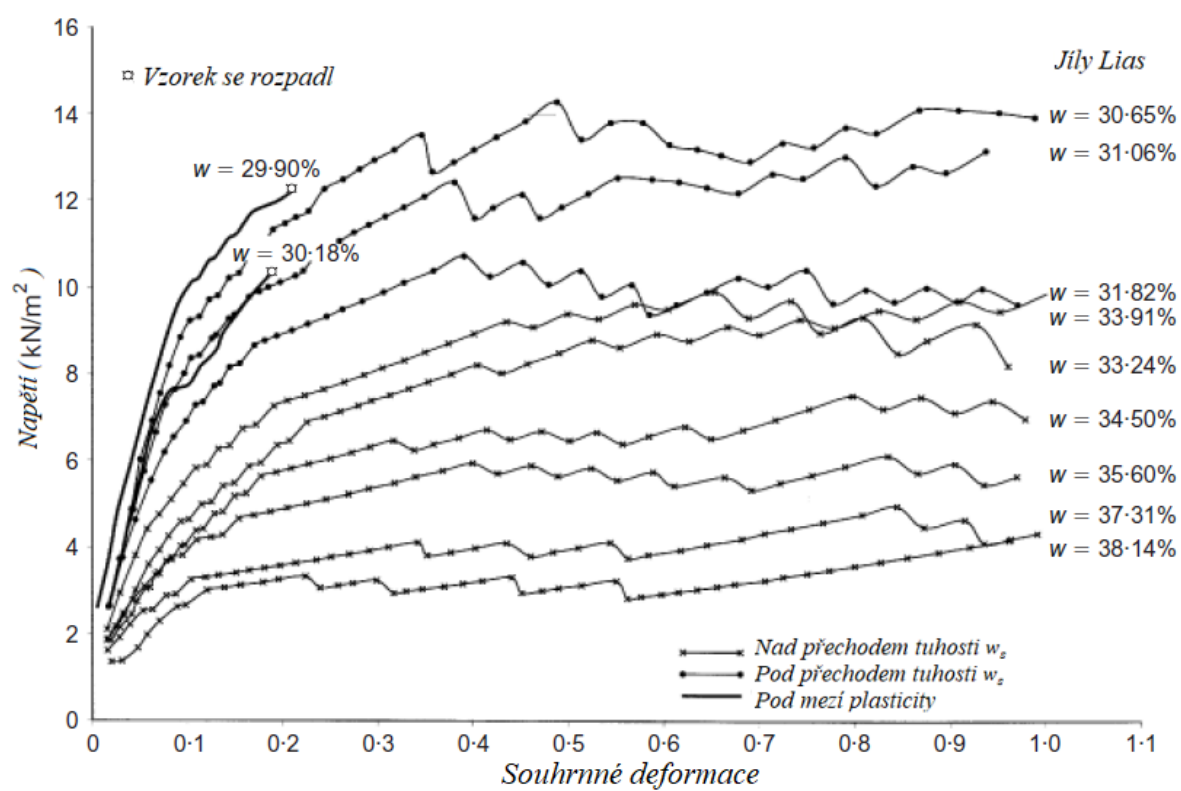
$$\sigma = \frac{P}{L \times d} \quad [12]$$

Použitá síla je udržována konstantní pro každý posuv a napětí je určeno jako střední hodnota z průměru vzorku na začátku a na konci každého cyklu.

Vytvořen je typický graf maximálního napětí versus průměr válečku [Obrázek 11] a napětí versus souhrnné deformace [Obrázek 12]. Když váleček zeminy dosáhne průměru 6 mm, zemina prochází plastickou deformací a napětí dál roste, dokud váleček nedosáhne průměru 3 mm nebo méně. Válečky, které nedosáhnou průměru 3 mm, jsou považovány za neplastické.

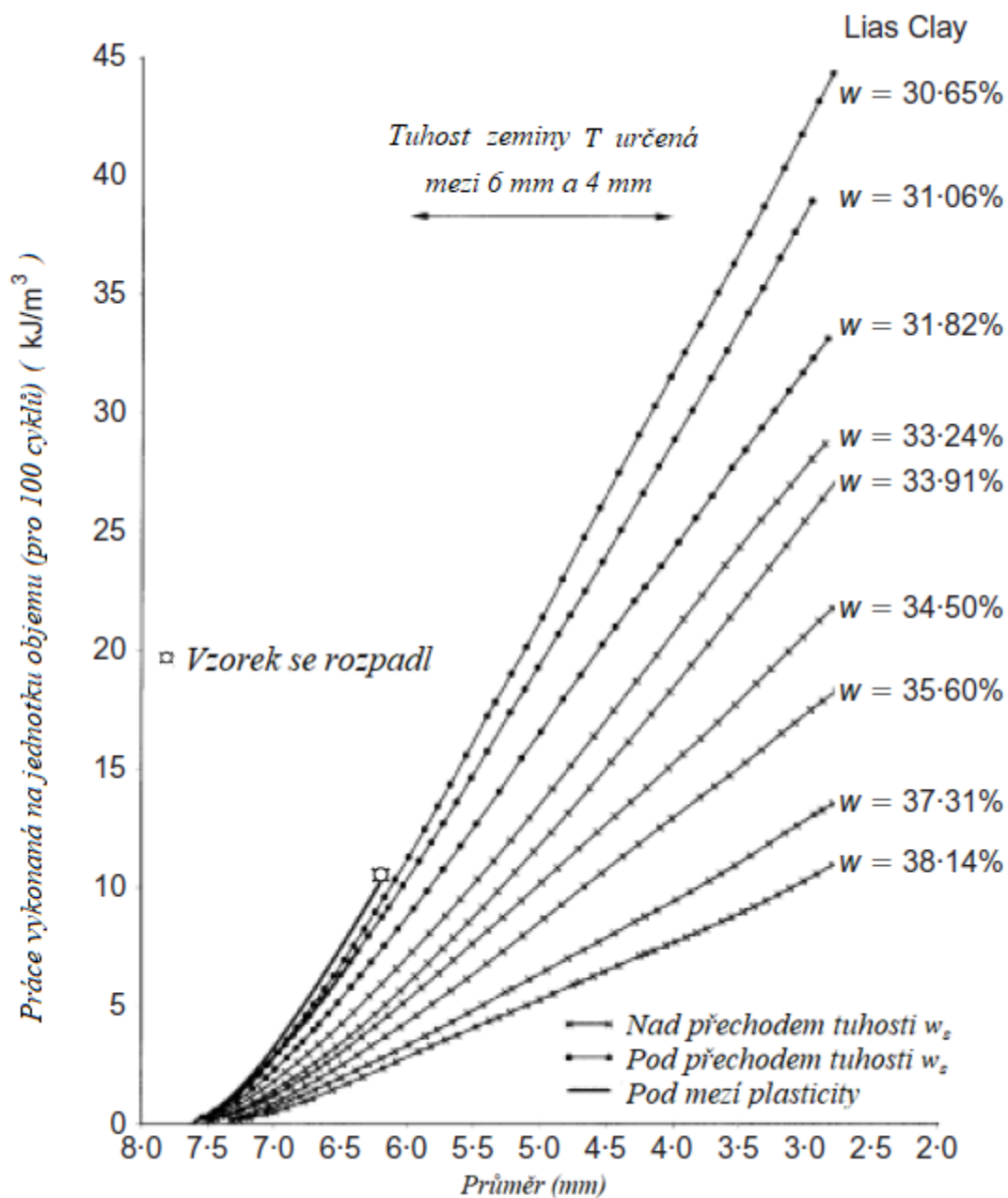


Obrázek 11 Vyhodnocení napětí versus průměr u vzorku podle G. E. Barnese (6)



Obrázek 12 Vyhodnocení napětí versus souhrnné deformace podle G. E. Barnese (6)

Plocha mezi dvěma navazujícími body [Obrázek 12] je součinem napětí a deformací pro daný posuv. Toto je práce vykonaná na jednotku objemu během posuvu a počítá se v kJ/m^3 . Ovšem se zmenšujícím se průměrem, se zvyšuje počet tahových/stlačujících napětí. Pro umožnění konstantního počtu cyklů je každá jednotka práce vydělena počtem cyklů pro daný posuv a vynásobena standardizovanou hodnotou. V tomto případě se přijalo jako standard 100 cyklů.

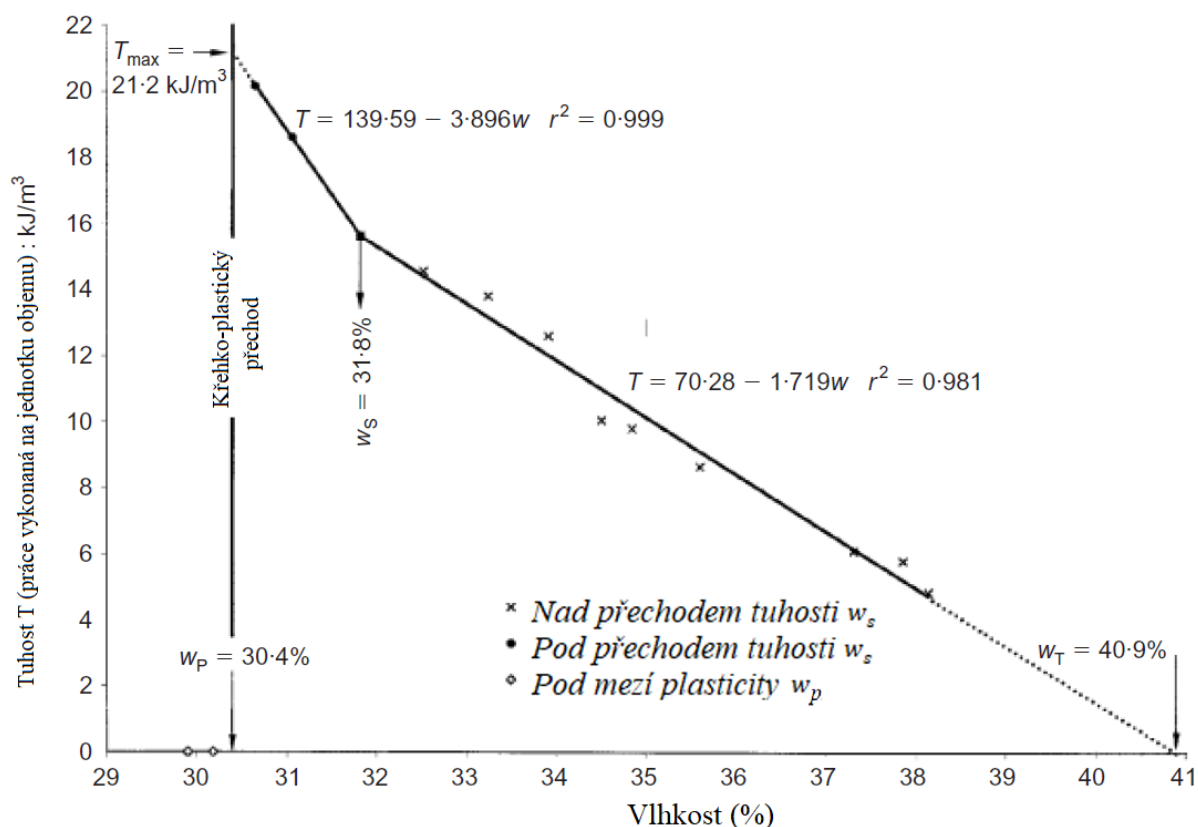


Obrázek 13 Vyhodnocení práce vykonaná na jednotku objemu versus průměr podle G. E. Barnese (6)

Práce vykonaná na jednotku objemu (pro 100 cyklů) je vynesena jako kumulativní hodnota proti průměru válečku. [Obrázek 13] uvádí typické hodnoty. Z tohoto grafu je hodnota tuhosti stanovena jako kumulativní práce potřebná pro zmenšení válečku z průměru 6 mm na průměr 4 mm, spíše než na průměr 3 mm. To poskytuje množství práce potřebné pro zmenšení objemu zeminy mezi deskami na přibližně 45 % původního objemu a je považováno za dostatečně přesné měření tuhosti zeminy v jejím plně plastickém stavu.

Každý bod, který zobrazuje [Obrázek 14] představuje zkoušku s konkrétní vlhkostí a tuhostí zvyšující se se snižující vlhkostí. Křehko-plastický přechod je jasně definován vzorky, které z křehké strany selžou bez dosažení plastického stavu a vzorky z plastické strany, které vykazují plastickou deformaci do průměru 3 mm a méně. Zjištěný přechod je ostrý a zřetelný, ve zlomku procenta vlhkosti. Mez plasticity je stanovena jako průměr dvou hodnot nejbližší k tomuto přechodu, jedné na křehké straně a druhé na plastické, za předpokladu, že tyto dvě hodnoty leží v rozsahu $PL/40$ od hodnoty meze plasticity.

Není vždy nutné stanovit tuhost zeminy v celém rozsahu vlhkosti. Pokud je vyžadována pouze mez plasticity, je doporučeno provést dva testy na křehké straně a alespoň tři na plastické straně.



Obrázek 14 Vyhodnocení práce vykonaná na jednotku objemu versus vlhkost podle G. E. Barnese (6)

2.4. Stanovení vlhkosti na mezi plasticity pomocí kuželové zkoušky

Výsledky kuželové zkoušky lze použít nejen pro stanovení vlhkosti na mezi tekutosti, ale i pro vyhodnocení vlhkosti na mezi plasticity. Vyhodnocení kuželové zkoušky spočívá v nalezení závislosti mezi vlhkostí zeminy a penetrací kužele d_{LL} do připraveného vzorku zeminy. Vlhkost na mezi tekutosti odpovídá penetraci kužele 20 mm (při použití 80 g kužele s vrcholovým úhlem 30°).

J. A. Harison (8) udává, že parametry soudržných zemin závisí ve značné míře na jejich vlhkosti w . Obecně platí, že čím vyšší vlhkost, tím nižší pevnost a naopak. Byl vytvořen lineární vztah mezi vlhkostí w a logaritmem neodvodněné smykové pevnosti nevysušené zeminy s_u , rovnicí:

$$w + A \times \log s_u = k \quad [13]$$

kde A a k jsou konstanty.

Výsledky podle Skepmtona & Northeye (9) [Obrázek 15] naznačují, že vztah mezi vlhkostí nebo indexem tekutosti I_L a s_u , není přímka v semi-logaritmickeém zobrazení, ale křivka. Dále jejich výsledky potvrzují, že smyková pevnost zemin na mezi plasticity je 100krát vyšší než na mezi tekutosti. [Obrázek 15] udává průměrnou neodvodněnou smykovou pevnost s_u na mezi tekutosti přibližně 1,1 kPa a asi 110 kPa na mezi plasticity. Minimální poloměr křivek r nastává přibližně okolo $s_u = 2,2$ kPa neboli na dvojnásobku smykové pevnosti zeminy s vlhkostí na mezi tekutosti. Za předpokladu, že horní a dolní část křivky jsou přímky, můžeme křivku nahradit dvěma přímkami, které se protínají v bodě r , tj. v bodě, ve kterém je s_u dvojnásobkem smykové pevnosti zeminy s vlhkostí na mezi tekutosti. Konkrétně, pokud by smyková pevnost zeminy s vlhkostí na mezi tekutosti byla 0,16 kPa, pak poloha bodu r odpovídá smykové pevnosti 0,32 kPa a kde je $I_L = 0,77$ [Obrázek 16].

Mez tekutosti lze stanovit kuželovou zkouškou. Výsledkem této zkoušky je hloubka penetrace d do vzorku zeminy po pěti sekundách. Čím větší hodnota d , tím nižší pevnost zkoušené zeminy. Lze tedy předpokládat, že s_u je inverzní funkce d neboli $s_u = A \times d^{-B}$, kde A a B jsou kladné konstanty. Vložením tohoto vztahu do rovnice [13], získáme vztah mezi w a d v podobě:

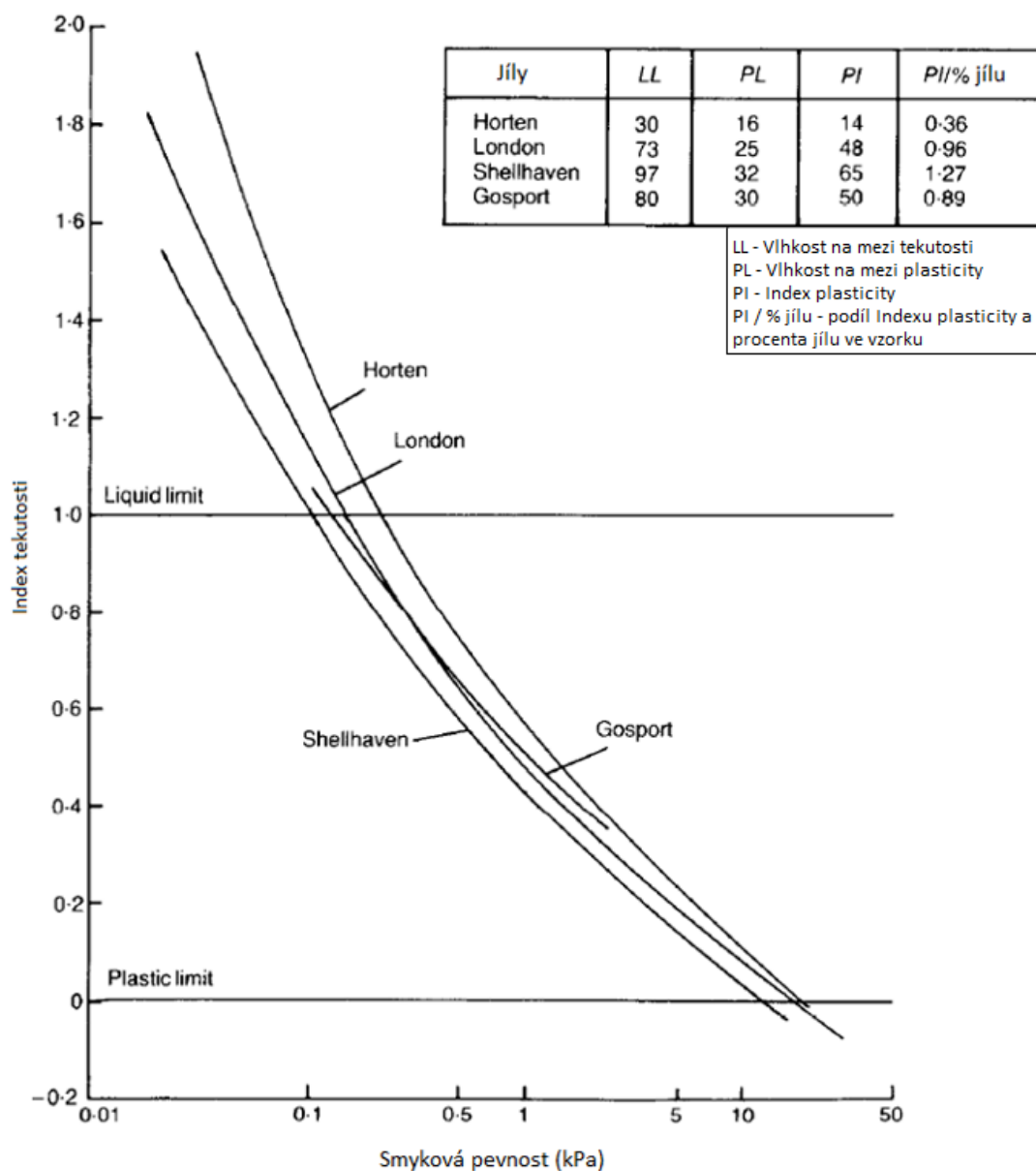
$$w - A' \times \log d = C \quad [14]$$

kde A' a C jsou konstanty.

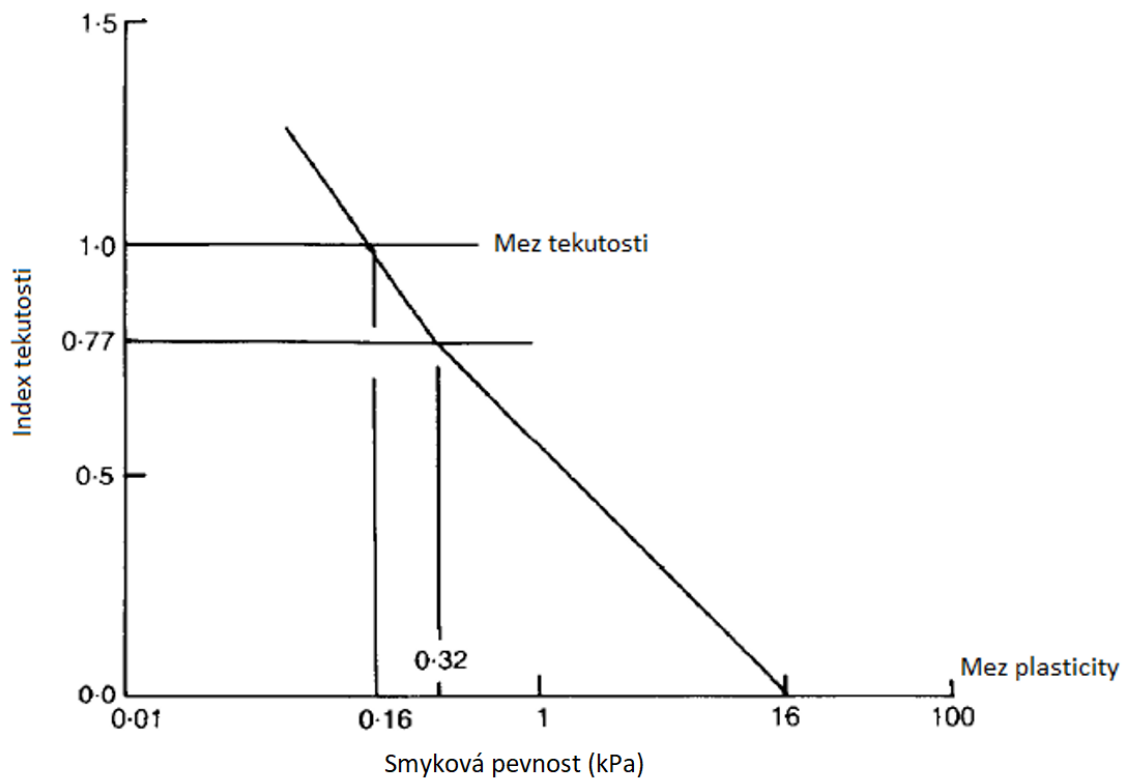
[Obrázek 17] ukazuje vztah mezi w nebo I_L a d . Jedná se o upravený [Obrázek 15], který se použije jako model. Pro hmotnost kužele W , Hansbo (11) udává následující rovnici:

$$s_u \times \frac{d^2}{W} = k \quad [15]$$

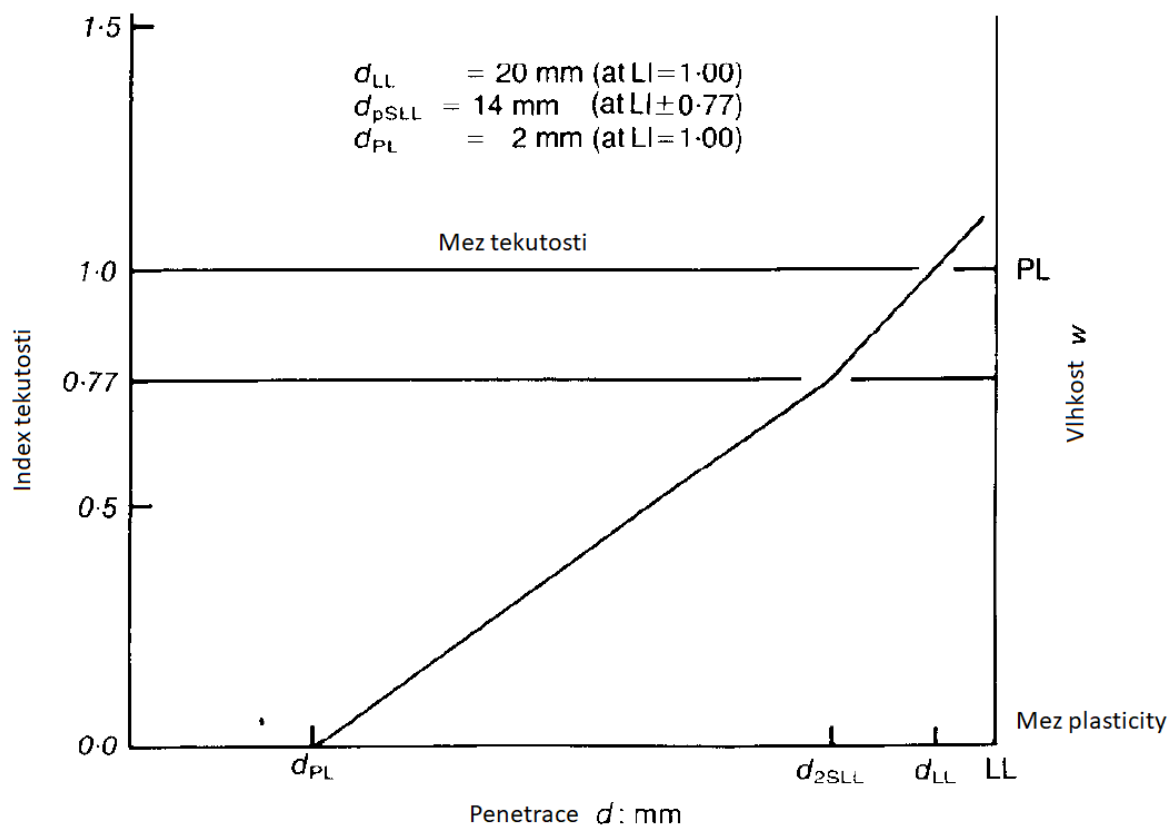
kde k je konstanta, W je tíha kužele.



Obrázek 15 Vztah mezi smykovou pevností a indexem tekutosti při kuželové zkoušce (9)



Obrázek 16 Idealizace vztahu mezi indexem tekutosti a smykové pevnosti podle kuželové zkoušky (9)



Obrázek 17 Vztah mezi indexem tekutosti, vlhkostí a penetrací podle kuželové zkoušky (8)

Důležité hodnoty ukazuje [Obrázek 17], jmenovitě bod na mezi plasticity d_{PL} , bod na mezi tekutosti d_{LL} , a bod d_{pSLL} při hodnotě s_u , která se rovná dvojnásobku hodnoty na mezi tekutosti.

Pro tuto kuželovou zkoušku je $d_{LL} = 20\text{mm}$. Použitím rovnice [15], penetrovaná hloubka pro s_u je x krát hodnota meze tekutosti d_x , která se dá získat z rovnice $d_x = d_{LL} \times \sqrt{\left(\frac{1}{x}\right) \times \left(\frac{k_x}{k}\right)}$, pokud je $d_{LL} = 20\text{mm}$ a $\sqrt{\left(\frac{k_x}{k}\right)} = K$, potom rovnice vypadá takto:

$$d_x = \frac{20 \times K}{x} \times \sqrt{x} \quad [16]$$

kde k_x je k v rovnici [15] pro hodnotu d_x . Hodnota k hlavně závisí na vrcholovém úhlu kužele, Wroth & Wood (10) ovšem uvádí, že dynamické účinky se přidružují k penetrované hloubce.

Tyto účinky způsobí mírný rozdíl mezi k a k_x , ale tento rozdíl je zanedbatelný pro $K = \sqrt{\left(\frac{k_x}{k}\right)}$.

Proto se předpokládá že $K = 1$. s_u na mezi plasticity je 100krát s_u na mezi tekutosti neboli $x = 100$. Použitím rovnice [16] lze vypočítat d_{PL} jako 2 mm, zatímco pro $x = 2$ (kdy s_u je dvojnásobek meze tekutosti), d_{2SLL} je 14 mm.

Je obtížné připravit vzorek zeminy, který poskytne hloubku penetrace 2 mm. Vztah mezi w a d jak uvádí [Obrázek 17] se skládá ze dvou přímek. Horní je použita pro stanovení meze tekutosti pro rozsah hodnot penetrace od 14 mm do 25 mm a spodní přímka pro stanovení meze plasticity. Teoreticky, na základě předpokladu, že průsečík dvou přímek bude v $d_{2SLL} = 14$ mm, spodní přímka může být vytvořena provedením další penetrační zkoušky, například s $d = 5$ mm. Pro přesnost je však vhodné provést aspoň dvě zkoušky, jednu s $d = 5$ mm a druhou s $d = 10$ mm.

Ze spodní přímky, se dá stanovit vlhkost pro d_{PL} (mez plasticity).

3. Vlastní měření

3.1. Zeminy použité při experimentu

V experimentu byly použity směsi písku a kaolinu.

KAOLIN

Parametry mletého a sušeného kaolinu uvádí [Tabulka 1].

Chemická analýza (%) (RTG fluorescence)			Granulometrie (%)		
složka	typicky	limit	podíl	typ	garance
L.o.I.	12,9		> 60 μm	0,005	<1,3
SiO ₂	47,3		> 20 μm	0,2	<5
Al ₂ O ₃	36,7	>36,0	10–20 μm	3,5	
Fe ₂ O ₃	0,9	<0,95	5–10 μm	10	
TiO ₂	0,18	<0,3	2–5 μm	24	
MgO	0,23		<2 μm	63	> 50
CaO	0,27		D50 μm	1,3	
K ₂ O	0,95	<1,25	Mineralogické složení %		
Na ₂ O	0,03		kaolinit		91 \pm 3
			křemen		2 \pm 1
			slídové minerály		7 \pm 2
Měrná hmotnost:			2,62 g/cm ³		
Objemová hmotnost:			300-400 kg/m ³		
Dodací vlhkost:			0,5-2 %		

Tabulka 1 Technické parametry: Kaolin – mletý a sušený

Rozmezí hodnot vlhkostí na mezi plasticity kaolínu je široké. Např. Abbeche (12), uvádí honodu *PL* kaolinu s měrnou hmotností 2,7 gcm⁻³ rovnu 39 %, Chegenizadeh (13), uvádí hodnotu *PL* = 23 %, dle Brandona (14), je vlhkost na mezi plasticity kaolinu 30 \pm 2 % a vlhkost na mezi tekutosti 64 \pm 3 %. Sridharan (15) otestoval 9 vzorků různých zemin kaolinitu a uvedl jejich hodnoty *PL*, které se pohybovaly v rozmezí 13,8 až 40,4 %. White (16) uvedl mez plasticity kaolinu v rozmezí 25 až 40 % a mez tekutosti v rozmezí 30 až 75 %.

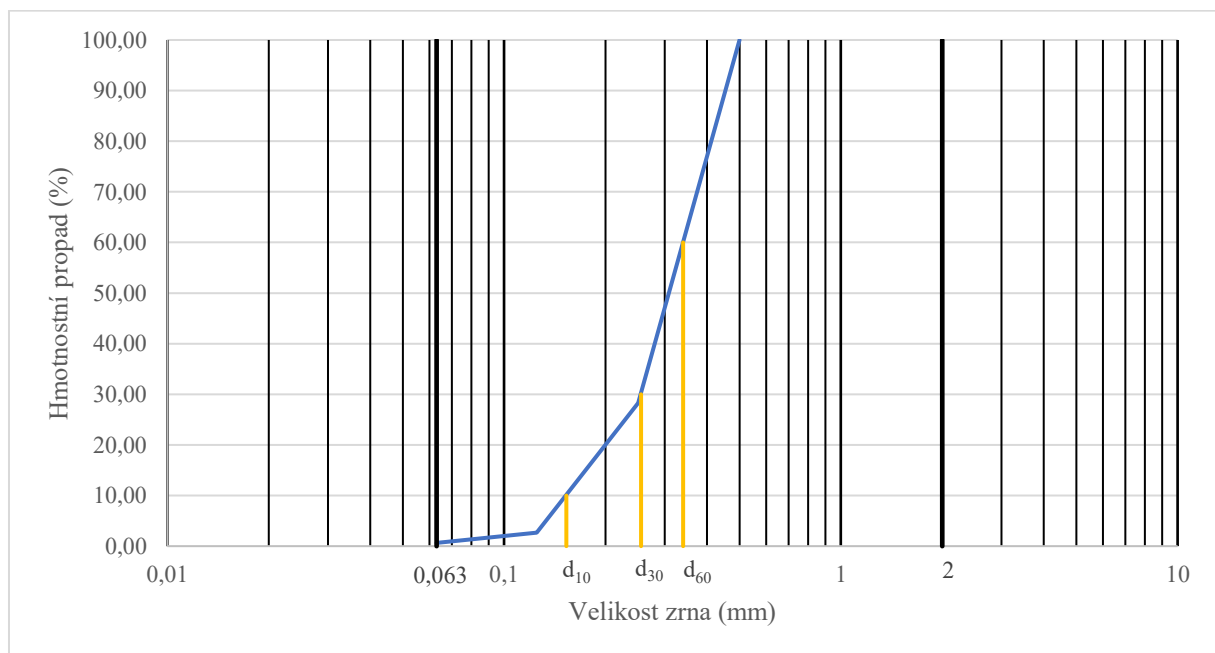
Písek

Výsledky granulometrické analýzy použitého písku uvádí [Tabulka 2]. Písek byl předem vysušen a následně proveden suchý síťový rozbor. Při analýze bylo použito 200 g suchého písku. Hmotnost byla určena na základě doporučeného minimálního množství vzorku z tabulky 1 normy ČSN EN ISO 17892-4 (17).

Stanovila se křivka zrnitosti [Obrázek 18] a klasifikace zeminy [Tabulka 3].

Průměr sít (mm)	Zbytek na sítu (g)	Zbytek na sítu (%)	Podsítné (%)
0,5	0	0	100,0
0,25	142,52	71,69	28,31
0,125	50,99	25,65	2,66
0,063	4,01	2,02	0,64
<0,063	1,28	0,64	0,00
Celkem	198,8	99,41	-

Tabulka 2 Granulometrie písku



Obrázek 18 Křivka zrnitosti písku

Charakter zrnitostní křivky pro písky a šterky se určí podle čísla nestejnorznitosti C_u , které charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti. Zeminy se mohou rozdělit podle tří stavů: stejnozrné, při kterém je $C_u < 5$, středně nestejnozrné, kdy se hodnota C_u pohybuje v rozmezí 5 až 15 a nestejnozrné, pro $C_u > 15$.

Vypočítá se podle vzorce:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [17]$$

kde d_{60} je velikost zrn při 60 % propadu a d_{10} je velikost zrn při 10 % propadu. Dále se charakterizují podle čísla křivosti C_c , které přibližně charakterizuje tvar křivky zrnitosti. Zeminy mohou mít C_c v rozmezí 1-3, při čemž mají plynulou křivku zrnitosti a C_c pro ostatní hodnoty, kdy mají zeminy např. chybějící frakci. Vypočítá se následujícím vzorcem:

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \times d_{10}} \quad [18]$$

kde d_{30} je velikost zrn při 30 % propadu. Písky jsou dobře zrněné v případě, že $C_u > 6$ a C_c se vyskytuje v rozmezí 1-3. Hodnoty písku použitého pro zkoušku vychází $C_u = 2,22$ a $C_c = 1,25$. Vzorek je tedy špatně zrněný (P).

Frakce	Velikost zrn	Označení	Zastoupení (%)
šterkovité	60-2	g	0
písčité	2-0,063	s	99
prach. + jíl.	<0,063	f	1
Klasifikace podle		Symbol	Název
ČSN 73 1005		SP	písek špatně zrněný
ČSN EN ISO 14688		Sa	písek

Tabulka 3 Popis a klasifikace zeminy

Příprava vzorků

Mísením kaolinu a písku bylo připraveno následujících 6 vzorků:

- Vzorek 1 (dále jen V1) obsahující 0 % písku a 100 % kaolinu
- Vzorek 2 (dále jen V2) obsahující 4,8 % písku a 95,2 % kaolinu
- Vzorek 3 (dále jen V3) obsahující 9,1 % písku a 90,9 % kaolinu
- Vzorek 4 (dále jen V4) obsahující 13,0 % písku a 87,0 % kaolinu
- Vzorek 5 (dále jen V5) obsahující 16,6 % písku a 83,4 % kaolinu
- Vzorek 6 (dále jen V6) obsahující 23,1 % písku a 76,9 % kaolinu

Konkrétní hmotnosti uvádí [Tabulka 4].

Číslo vzorku	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Kaolin (g)	340	337	341	341	337	340
Písek (g)	0	17	34	51	67	102
Celkem (g)	340	354	375	392	404	442
Množství písku (%)	0,0	4,8	9,1	13,0	16,6	23,1
Množství kaolinu (%)	100,0	95,2	90,9	87,0	83,4	76,9

Tabulka 4 Procentuální zastoupení písku a kaolinu ve vzorcích V1 – V6

Vzorek V1 (pouze kaolin) byl smíchán s takovým množstvím vody, aby výsledná vlhkost byla cca 33 %. A protože se předpokládalo, že s rostoucím množstvím písku se bude hodnota vlhkosti na mezi platicity zmenšovat, snižovalo se i množství vody pro přípravu směsí V2 – V6. Vzorky byly důkladně promíchány a po dobu 24 hodin ponechány v uzavřené nádobě.

3.2. Vlhkost na mezi plasticity stanovená normovou metodou

Vlhkost na mezi plasticity PL byla stanovena v souladu s normou ČSN EN ISO 17892-12:2018 dle postupu popsáném výše v kapitole 2.1., podle které se vlhkost u dvou mezi plasticity nesmí lišit o více než 2 % absolutní hodnoty pro PL menší rovno 40 %, nebo více než 5 % relativní hodnoty pro PL větší než 40 %.



Obrázek 19 Příprava vzorku pro stanovení meze plasticity normovou metodou

Výsledné hodnoty vlhkosti na mezi plasticity uvádí [Tabulka 5]. Výsledky ukazují, že nejvyšší hodnota na mezi plasticity patří čistému kaolinu a nejnižší vzorku s nejvyšším obsahem písku. Z výsledků lze tedy vyčíst, že s rostoucím obsahem písku ve vzorku klesá vlhkost na mezi plasticity.

Hodnoty meze plasticity PL a jejich průměrné hodnoty \overline{PL} byly vyneseny do grafu a může být pozorován jejich klesající trend [Obrázek 20].

N	V1	V1	V2	V2	V3	V3	V4	V4	V5	V5	V6	V6
n	79	97	58	78	73	84	59	86	54	71	67	70
m_c (g)	15,56	16,77	15,86	17,06	15,69	15,07	15,93	15,63	15,88	16,21	15,32	16,13
m_1 (g)	20,69	19,99	19,81	21,46	18,44	18,91	18,95	20,04	20,08	19,73	18,61	19,70
m_2 (g)	19,36	19,23	18,87	20,40	17,80	18,00	18,28	19,08	19,19	18,99	17,96	18,95
PL (%)	32,4	32,1	31,2	31,7	30,3	31,1	28,5	27,8	26,9	26,6	24,6	26,6
\overline{PL} (%)	32,23		31,48		30,69		28,17		26,75		25,61	

N – označení vzorku

n – číslo vysoušecí nádoby

m_c – hmotnost vysoušecí nádoby (g)

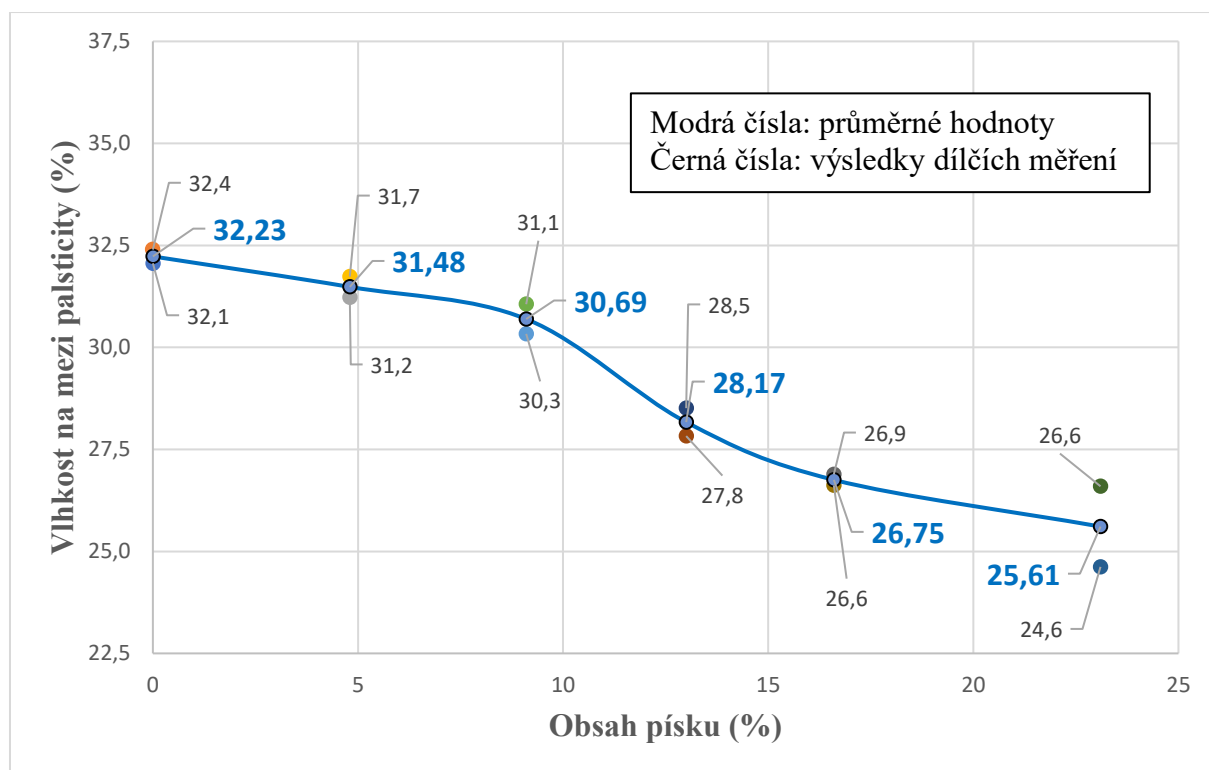
m_1 – hmotnost vysoušecí nádoby a vlhkého zkušební vzorku (g)

m_2 – hmotnost vysoušecí nádoby a suchého zkušební vzorku (g)

PL – hodnoty na mezi plasticity

\overline{PL} – průměrná hodnota

Tabulka 5 Hodnoty PL stanovené normovou metodou



Obrázek 20 Hodnoty vlhkosti na mezi plasticity stanovené normovou metodou

3.3. Vlhkost na mezi plasticity stanovená ohybovým testem

Pro tuto metodu byl vyroben válečkovač podle návodu [Obrázek 1] a tato pomůcka byla použita pro zpracování vzorků V1 až V6.



Obrázek 21 Příprava vzorku pro zkoušku ohybovým testem

Pro účel tohoto experimentu byly vzorky zemin testovány pro čtyři nebo pět různých vlhkostí a u některých vzorků bylo využito rovnice ohybové křivky [4] pro určení dalších bodů. Vzorky byly testovány následujícíce:

- Vzorek 1: pro 4 různé vlhkosti (1 bod dopočítán z ohybové křivky)
- Vzorek 2: pro 5 různých vlhkostí
- Vzorek 3: pro 5 různých vlhkostí (1 bod dopočítán z ohybové křivky)
- Vzorek 4: pro 4 různé vlhkosti (2 body dopočítány z ohybové křivky)
- Vzorek 5: pro 5 různých vlhkostí (1 bod dopočítán z ohybové křivky)
- Vzorek 6: pro 4 různé vlhkosti (2 body dopočítány z ohybové křivky)

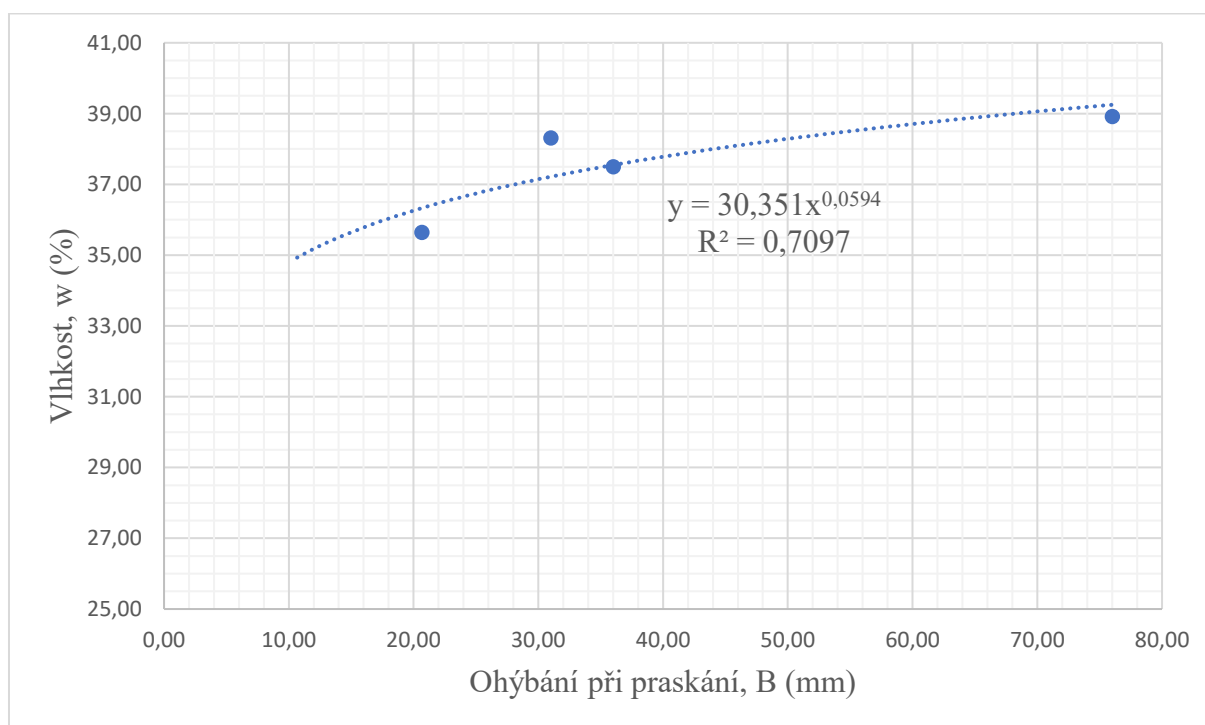
Vzorek 1

Vzorek V1 se skládá ze 100 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 4krát pro 4 různé vlhkosti vzorku a vlhkost byla dopočítána u bodu V14 pro $B = 40$ podle vzorce parabolické křivky [4], [Tabulka 6] uvádí výsledky.

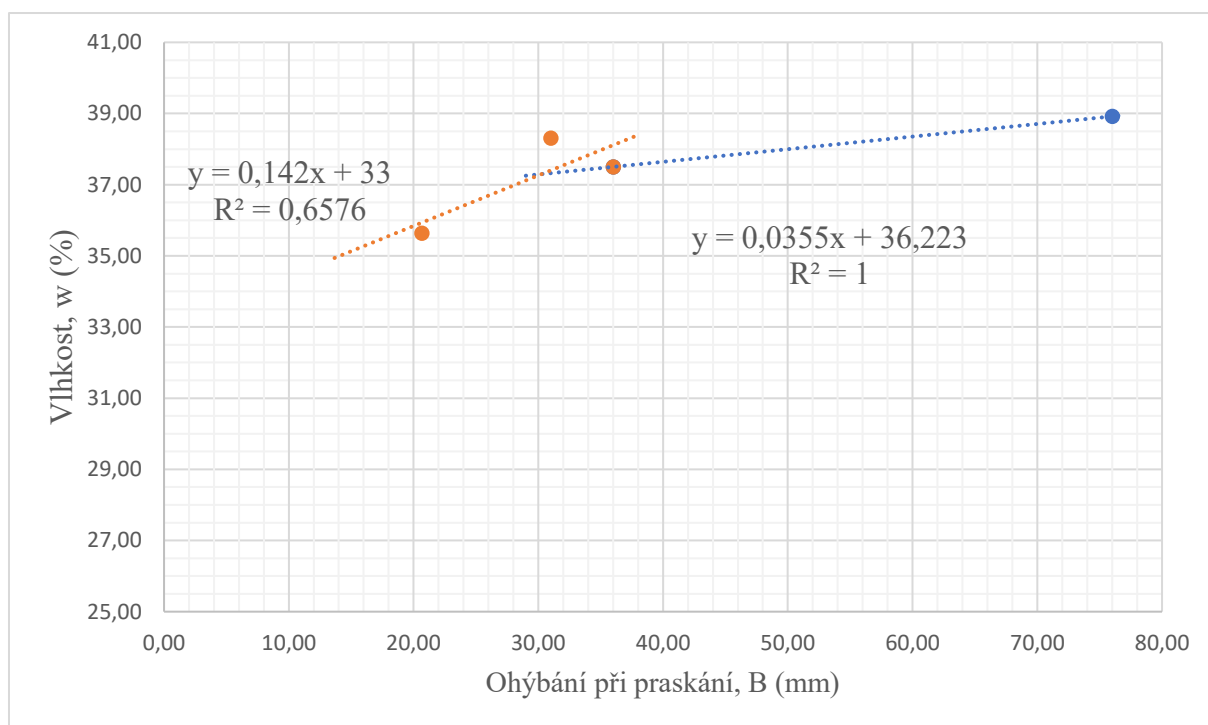
V1	B (mm)	w (%)
V11	20,67	35,64
V12	31,00	38,31
V13	36,00	37,50
V14	40,00	38,07
V15	76,00	38,92
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 6 Hodnoty vzorku V1 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 22] a se dvěma protínajícími se přímkami [Obrázek 23]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 33,0 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 23].



Obrázek 22 Parabolická křivka, vzorek V1



Obrázek 23 Protínající se přímky, vzorek V1

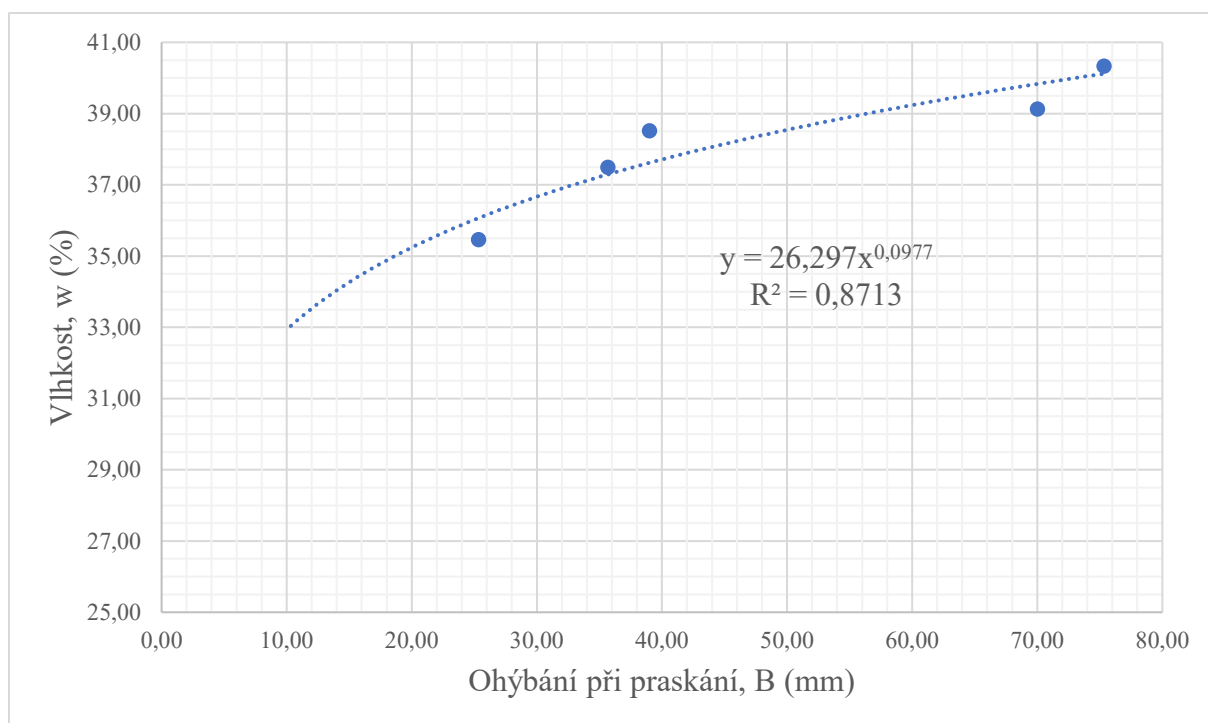
Vzorek V2

Vzorek 2 se skládá z 4,8 % písku a 95,2 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 5krát pro 5 různých vlhkostí vzorku, [Tabulka 7] uvádí výsledky.

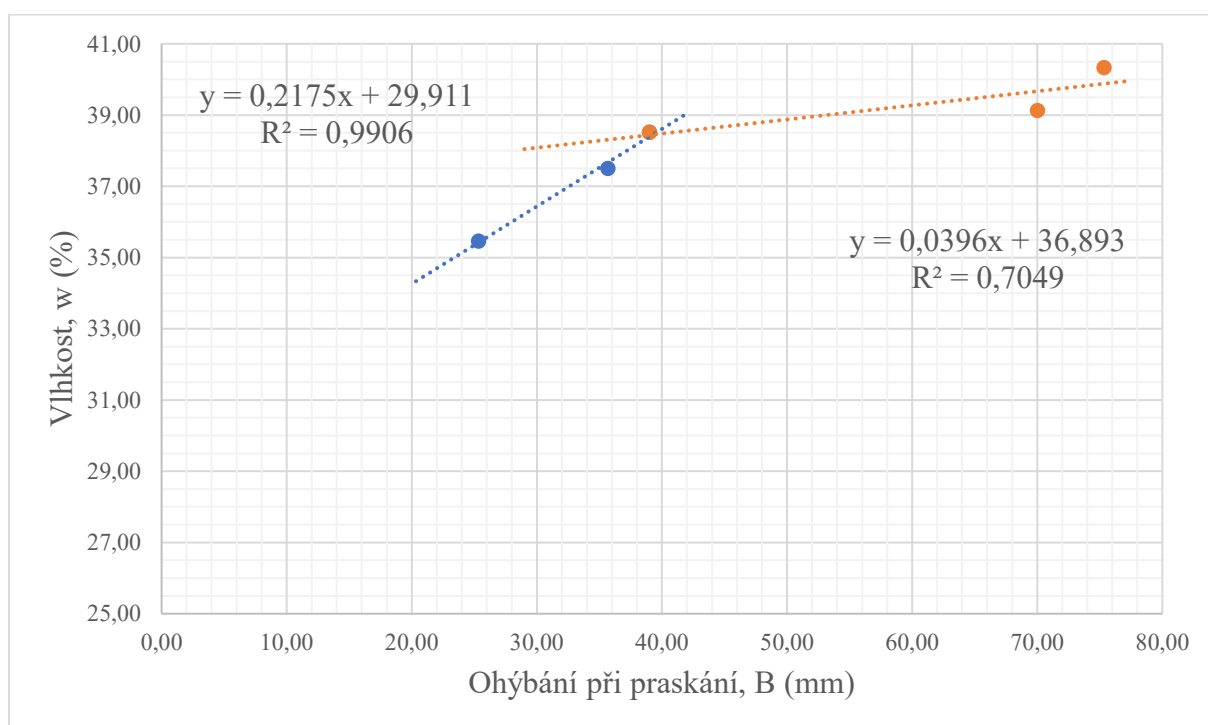
V2	B (mm)	w (%)
V21	75,33	40,34
V22	39,00	38,52
V23	70,00	39,13
V24	35,67	37,50
V25	25,33	35,46
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 7 Hodnoty vzorku V2 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 24] a se dvěma protínajícími přímkami [Obrázek 25]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 29,9 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 25].



Obrázek 24 Parabolická křivka, vzorek V2



Obrázek 25 Protínající se přímky, vzorek V2

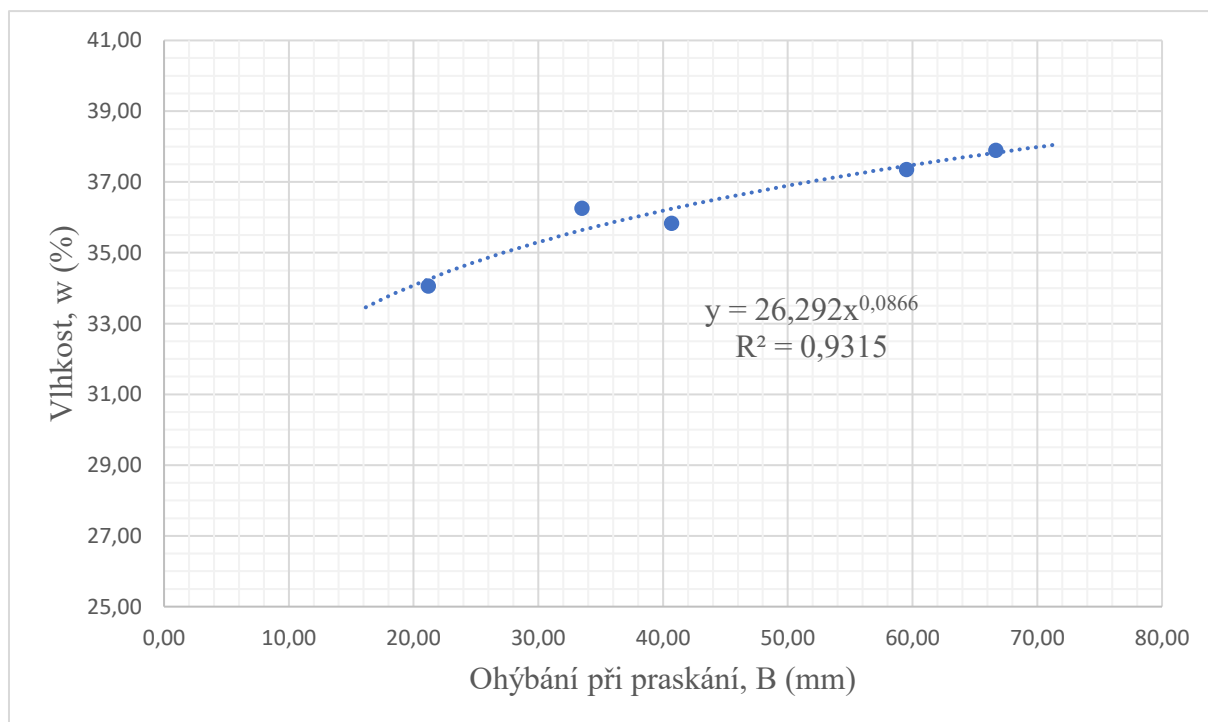
Vzorek 3

Vzorek 3 se skládá z 9,1 % písku a 90,9 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 5krát pro 5 různých vlhkostí vzorku a vlhkost byla dopočítána u jednoho bodu V31 pro $B = 5$ podle vzorce parabolické křivky [4], [Tabulka 8] uvádí výsledky.

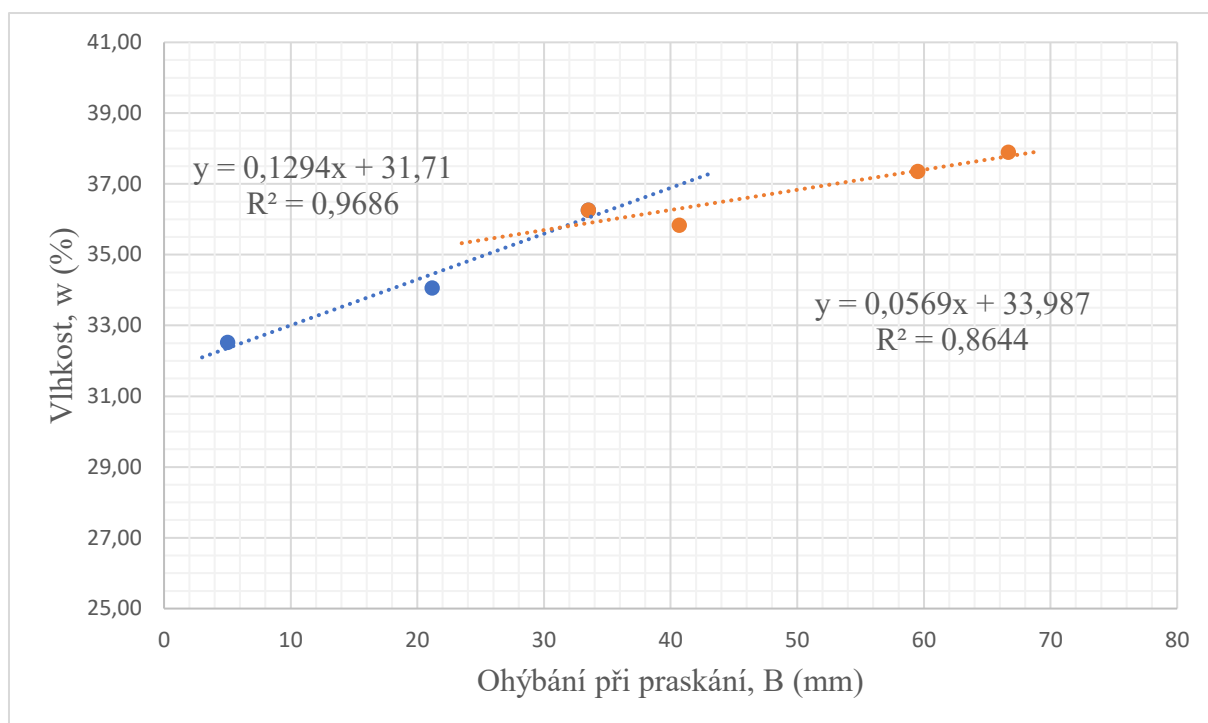
V3	B (mm)	w (%)
V31	5,00	32,52
V32	21,17	34,07
V33	33,50	36,26
V34	40,67	35,83
V35	59,50	37,36
V36	66,67	37,89
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 8 Hodnoty vzorku V3 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 26] a se dvěma protínajícími přímkami [Obrázek 27]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 31,7 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 27].



Obrázek 26 Parabolická křivka, vzorek V3



Obrázek 27 Protínající se přímky, vzorek V3

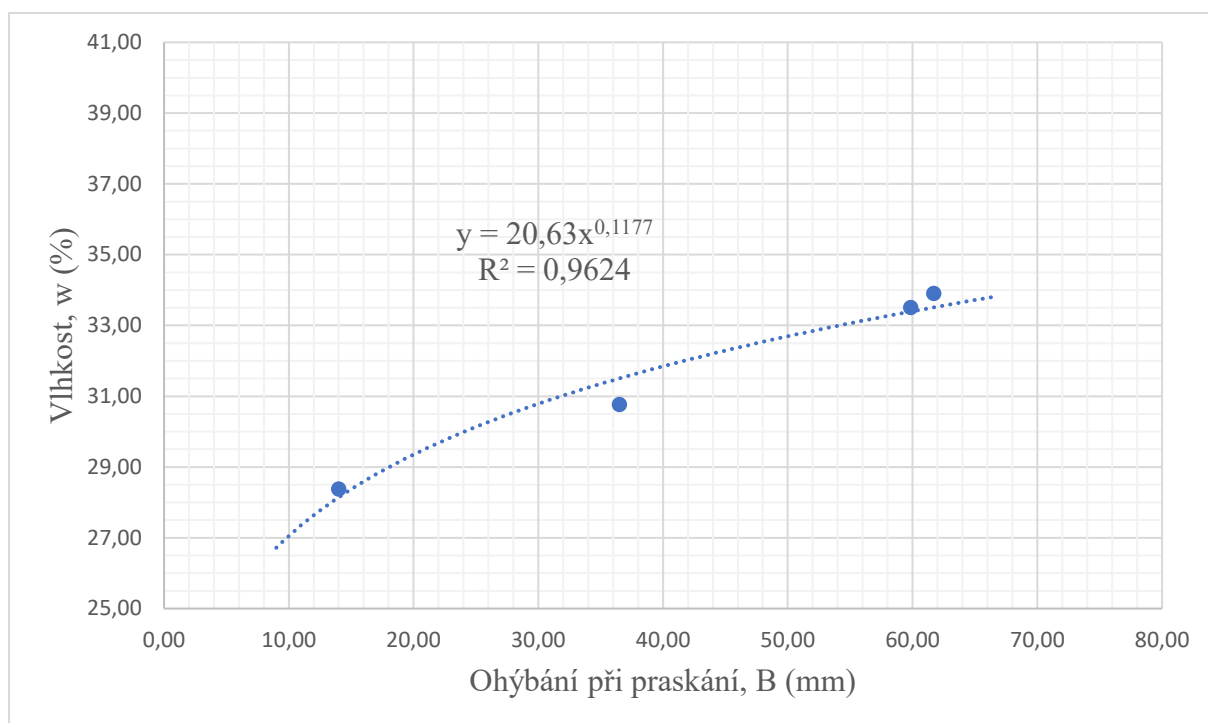
Vzorek 4

Vzorek 4 se skládá z 13,0 % písku a 87,0 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 4krát pro 4 různé vlhkosti vzorku a vlhkost byla dopočítána u bodů V14 pro $B = 40$ a $B = 50$ podle vzorce parabolické křivky [4], [Tabulka 9] uvádí výsledky.

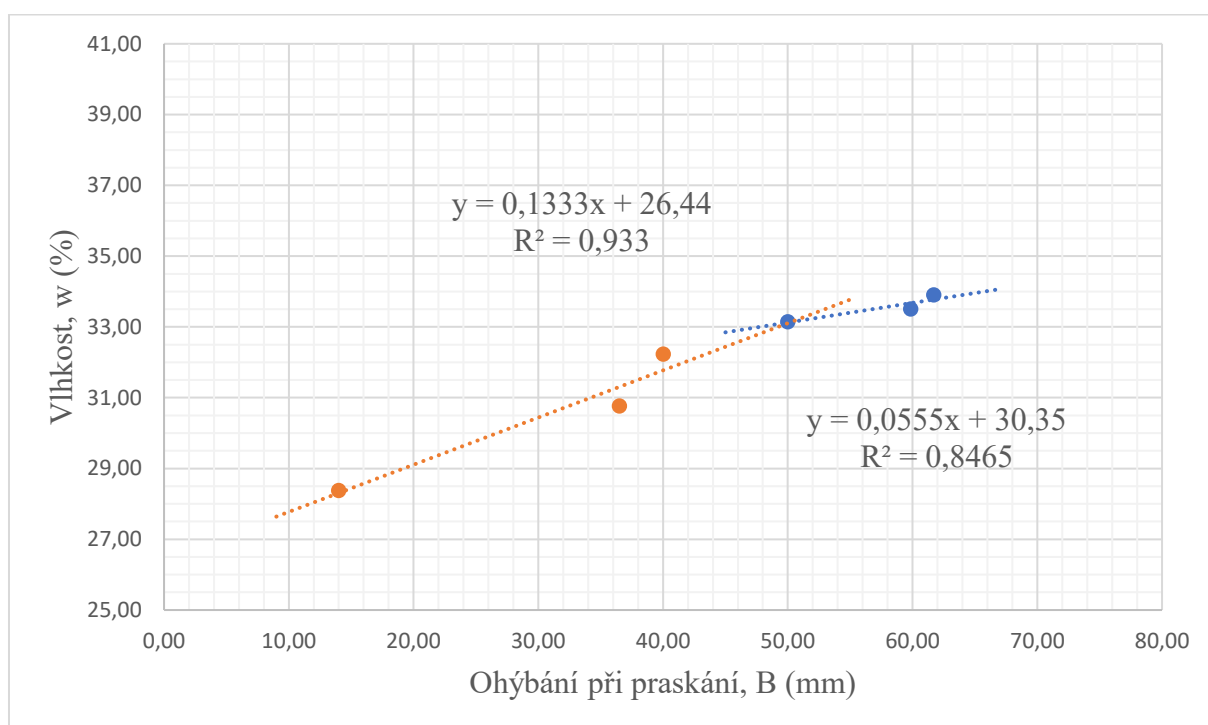
V4	B (mm)	w (%)
V41	14,00	28,38
V42	36,50	30,77
V43	40,00	32,24
V44	50,00	33,15
V45	59,83	33,51
V46	61,70	33,91
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 9 Hodnoty vzorku V4 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 28] a se dvěma protínajícíma přímkami [Obrázek 29]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 26,4 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 29].



Obrázek 28 Parabolická křivka, vzorek V4



Obrázek 29 Protínající se přímky, vzorek V4

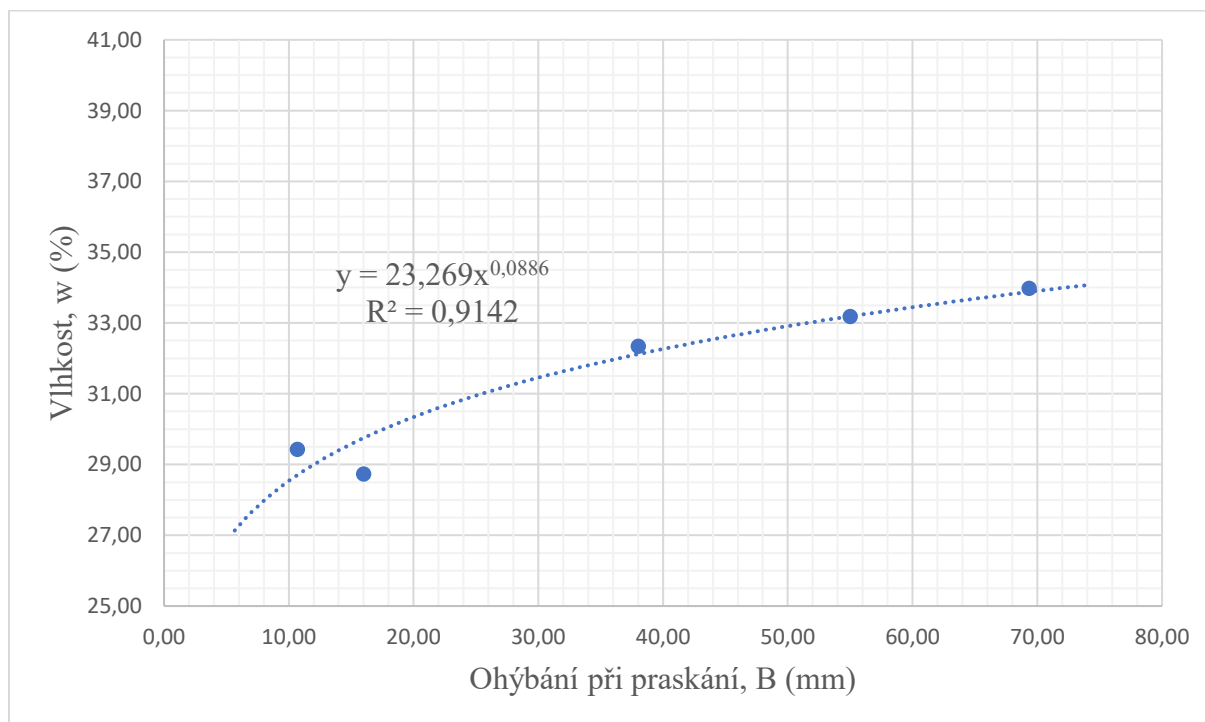
Vzorek 5

Vzorek 5 se skládá z 16,6 % písku a 83,4 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 5krát pro 5 různých vlhkostí vzorku a vlhkost byla dopočítána u jednoho bodu V53 pro $B = 30$ podle vzorce parabolické křivky [4], [Tabulka 10] uvádí výsledky.

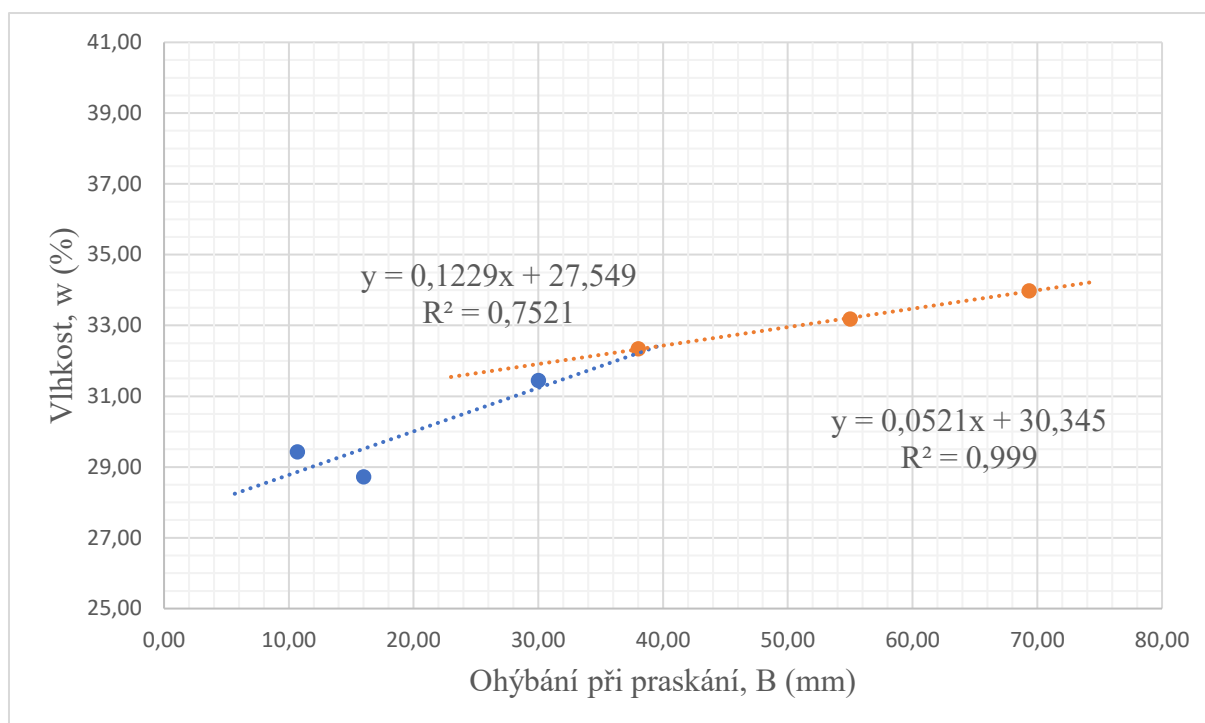
V5	B (mm)	w (%)
V51	10,67	29,43
V52	16,00	28,73
V53	30,00	31,45
V54	38,00	32,34
V55	55,00	33,18
V56	69,33	33,98
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 10 Hodnoty vzorku V5 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 30] a se dvěma protínajícími přímkami [Obrázek 31]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 27,5 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 31].



Obrázek 30 Parabolická křivka, vzorek V5



Obrázek 31 Protínající se přímky, vzorek V5

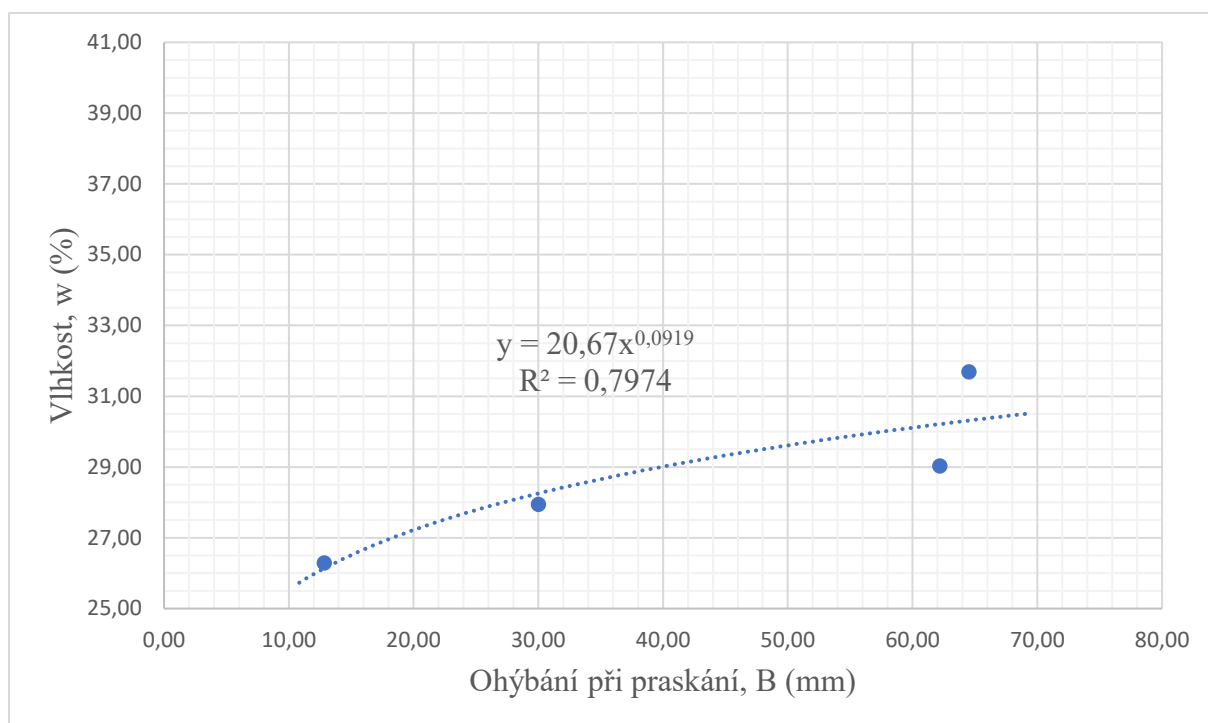
Vzorek 6

Vzorek 6 se skládá z 23,1 % písku a 76,9 % kaolinu. Ohybový test tohoto vzorku byl proveden 4krát pro 4 různé vlhkosti vzorku a vlhkost byla dopočítána u bodů V14 pro $B = 30$ a $B = 40$ podle vzorce parabolické křivky [4], [Tabulka 11] uvádí výsledky.

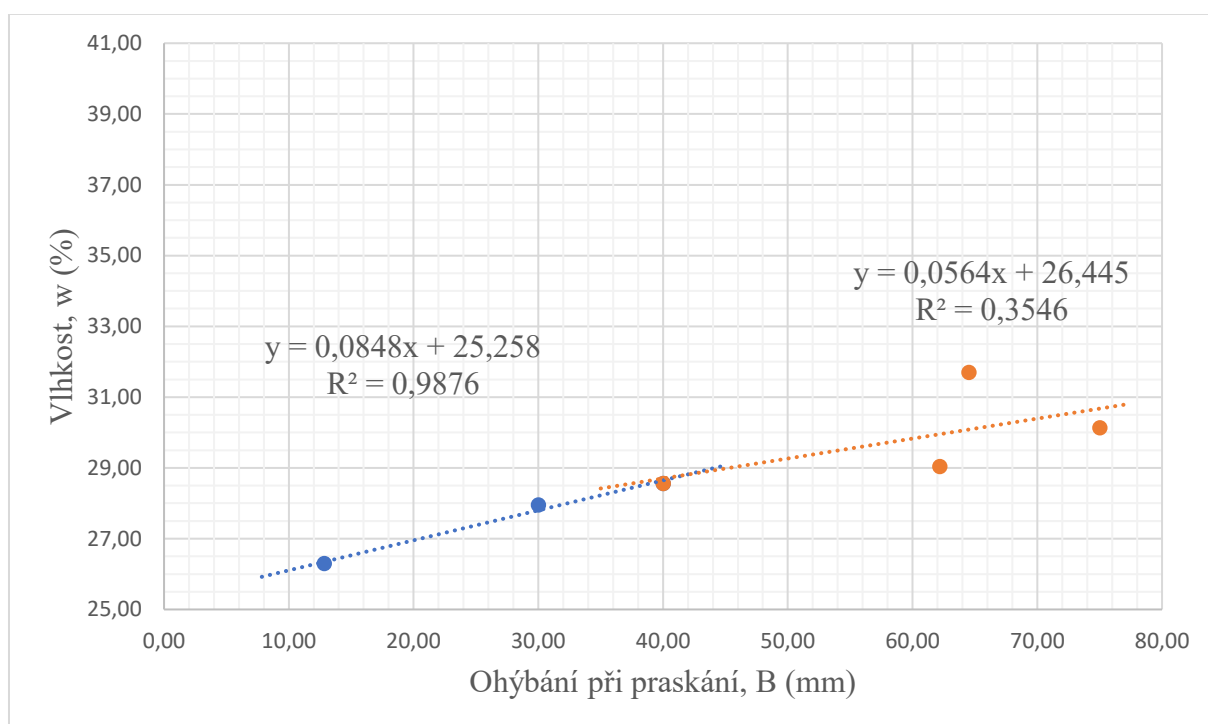
V6	B (mm)	w (%)
V61	12,83	26,29
V62	30,00	27,95
V63	40,00	28,55
V64	75,00	30,13
V65	62,17	29,03
V66	64,50	31,69
V – označení vzorku B – ohyb při praskání w – vlhkost		

Tabulka 11 Hodnoty vzorku V6 - stanovení ohybovým testem

Zobrazeno je grafické znázornění výsledků ohybového testu s proložením mocninnou funkcí [Obrázek 32] a se dvěma protínajícíma přímkami [Obrázek 33]. Vlhkost na mezi plasticity je rovna průniku oranžové přímky s osou y a je rovna hodnotě 25,3 % podle rovnice, jak uvádí [Obrázek 33].



Obrázek 32 Parabolická křivka, vzorek V6



Obrázek 33 Protínající se přímky, vzorek V6

4. Vyhodnocení výsledků

Pomocí grafického zobrazení výsledků ohybového testu (vlhkost w versus praskání při ohybu B), je možno stanovit hodnoty j_{stiff} , c_{stiff} , j_{soft} a c_{soft} . S pomocí těchto hodnot můžeme vyjádřit vlhkost na mezi plasticity $PL_{oh.test}$, mez ohybu BL , tuho-měkkou mez SSL a ohyb při praskání B_{SS} .

	V1	V2	V3	V4	V5	V6
j_{stiff}	0,142	0,218	0,129	0,133	0,122	0,085
c_{stiff}	33,00	29,91	31,71	26,44	27,55	25,26
j_{soft}	0,036	0,040	0,057	0,055	0,052	0,056
c_{soft}	36,22	36,89	33,99	30,35	30,34	26,46
$PL_{\check{C}SN}$ (%)	32,23	31,48	30,69	28,17	26,75	25,61
$PL_{oh.test}$ (%)	33,00	29,91	31,71	26,44	27,55	25,26
SSL (%)	37,30	38,45	35,77	33,14	32,39	28,80
BL (%)	39,36	40,39	39,02	35,26	34,95	31,43
B_{SS} (mm)	30,26	39,25	31,41	50,26	39,42	41,80

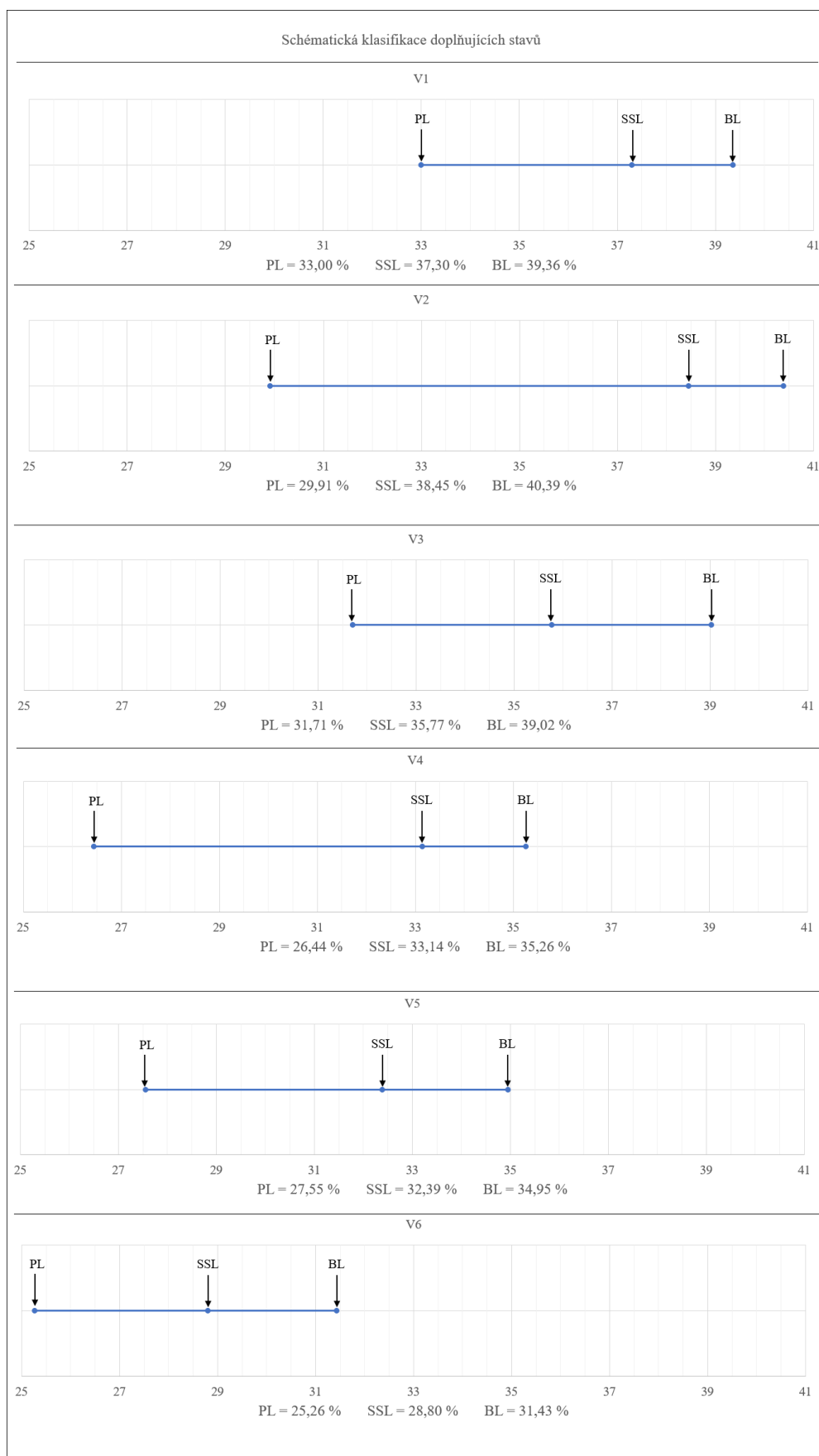
Tabulka 12 Hodnoty stanové ohybovým testem

Pomocí hodnot, které uvádí [Tabulka 12] je vytvořena schématická klasifikace doplňujících stavů zemin pro všechny vzorky V1 až V6 [Obrázek 34]. Z tohoto grafického znázornění lze vypožorovat klesající trend obou stavů BL a SSL se zvyšujícím se zastoupením písku ve směsi. Porovnání BL , SSL a meze plasticity provedenou podle ohybového testu $PL_{oh.test}$ u zkoušených zemin znázorňuje [Obrázek 35].

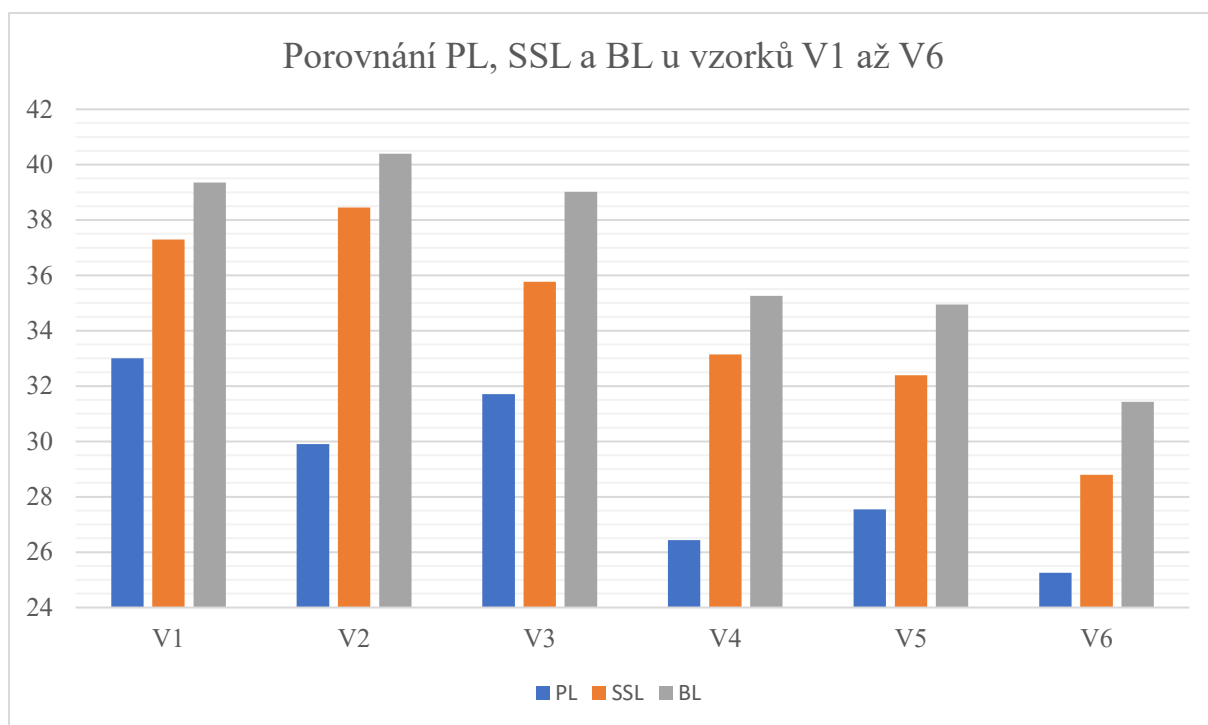
Výsledné hodnoty meze plasticity stanovené normovou metodou byly porovnány nejen s výsledky ohybového testu, ale i s výsledky podle Shimobeho (18). Ten vytvořil na základě mnoha měření vztah mezi vlhkostí na mezi plasticity stanovou normovou metodou a mezí plasticity stanovenou ohybovým testem (žlutá přímka, [Obrázek 37]), jehož rovnice je následující:

$$PL_{\check{C}SN} = 0,915 \times PL_{oh.test} + 2,03 \quad [19]$$

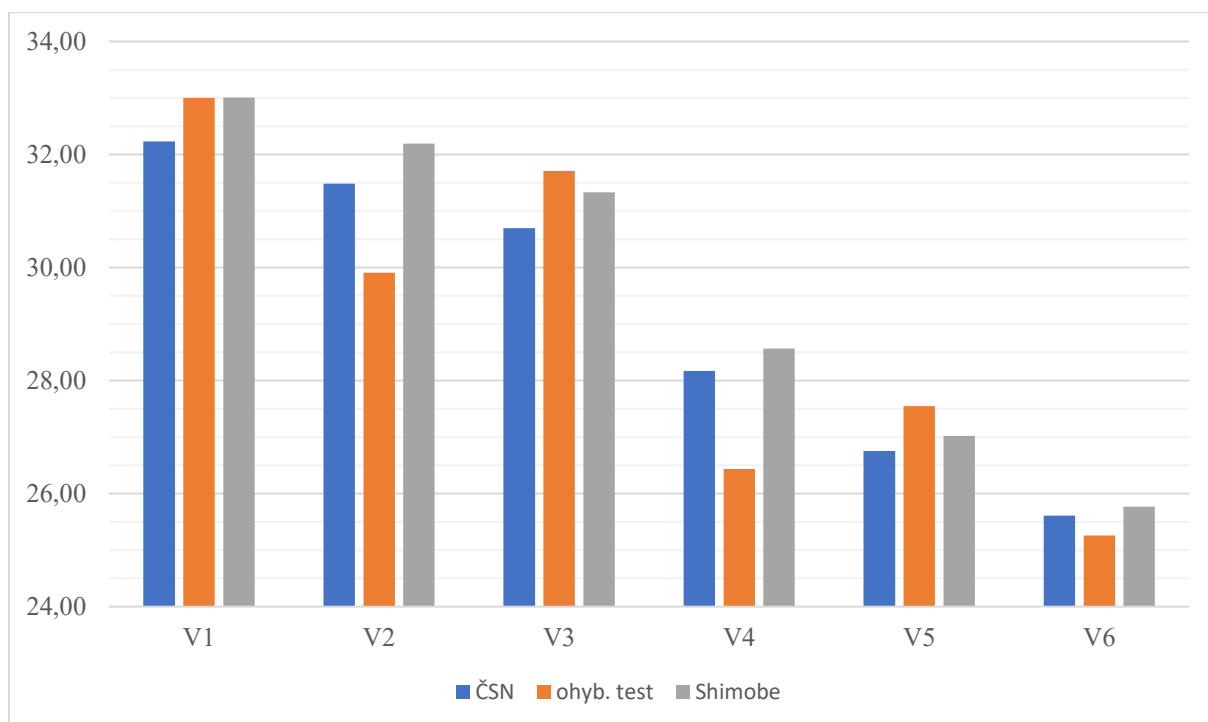
Uvedeno je grafické znázornění porovnání těchto hodnot [Obrázek 36] a vyhodnocení této práce [Obrázek 37].



Obrázek 34 Klasifikace doplňujících stavů u vzorků ohybovým testem



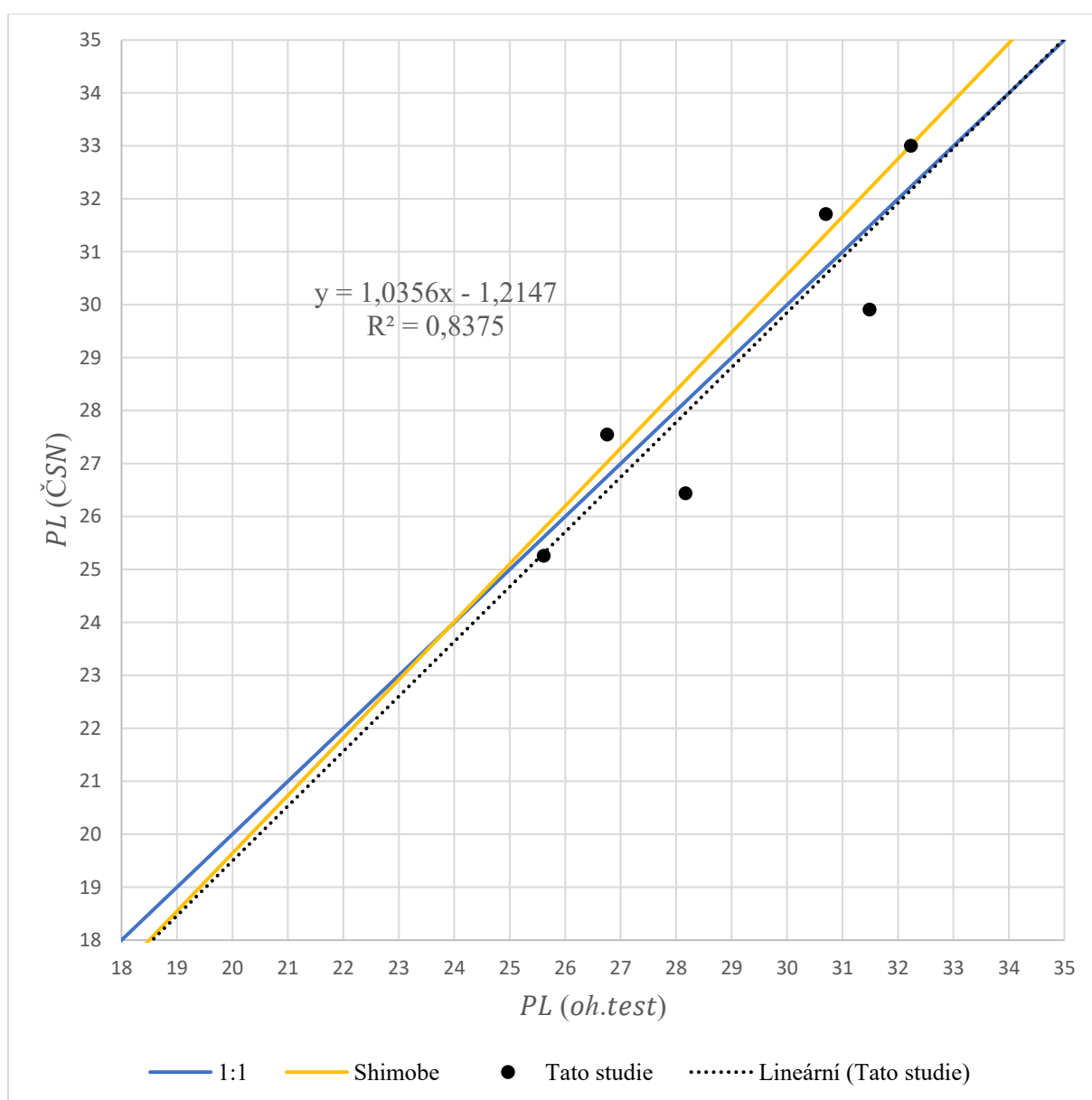
Obrázek 35 Porovnání doplňujících stavů pro vzorky



Obrázek 36 Porovnání vlhkostí na mezi plasticity zkoušených metod (Obsah kaolinu: V1 – 100 %, V2 – 95,2 %, V3 – 90,9 %, V4 – 87,0 %, V5 – 83,4 %, V6 – 76,9 %)

Díky porovnání meze plasticity všech vzorků lze pozorovat rozdílnou klesající tendenci metod. Normová metoda udržuje stálé klesání u všech vzorků. Shimobe má taktéž podobnou klesající tendenci, ale mez plasticity se přibližuje hodnotě normové metody s přibývajícím pískem v zemině, a naopak je rozdíl mezi těmito mezemi plasticity větší při nižším obsahu písku ve vzorku.

V grafickém vyhodnocení lze vidět lineární spojnici trendu, která byla vytvořena z výsledků této studie. Tato spojnice trendu se pomalu přibližuje přímce 1:1 a taktéž si udržuje strmější stoupající tendenci oproti této linii, jako má Shimobe, ovšem na rozdíl Shimobeho přímky nemá takový prudký růst.



Obrázek 37 Grafické vyhodnocení této studie

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zaprvé provést rešerši metod pro stanovení meze plasticity a zadruhé stanovit vlhkost na mezi plasticity pro zeminy s rozdílným obsahem jílovité frakce normovou metodou a ohybovým testem a srovnat výsledky měření. Naměřené hodnoty prokázaly, že s rostoucím obsahem písku ve směsi, klesá vlhkost na mezi plasticity. Dále se stanovily doplňující hodnoty pro stavy zemin podle ohybového testu pro všechny testované zeminy, u kterých hodnota také klesá se zvyšujícím se obsahem písku v zemině.

Ohybová zkouška byla provedena podle daných instrukcí, ovšem její provedení bylo ze začátku mnohem náročnější než provádění dle normové metody. Pokud není proužek zeminy přesně nebo jen mírně širší než 3 mm, nebo je šířka proužku zeminy v jeho délce více proměnlivá, může se vzorek místo do kruhu, vytvarovat do oválného tvaru. Problémy také nastávají při hledání správné rychlosti válení a aplikování dostatečného tlaku na válečí přístroj. Pokud je jedna ze zmíněných veličin moc velká nebo naopak příliš malá, vzorek má tendenci se deformovat, vybočovat nebo se předčasně poruší, to ho dělá nepoužitelným. Další problém tkvěl v nalepování (resp. přilnutí) vzorku k povrchům podložky i válečkovači. Nesprávně připravený vzorek může porušit integritu válečku, také může vytvořit velice tenkou vrstvu filmu nebo malé hrbolky na površích válečkovače, které dále komplikují provádění. To vyžaduje, aby nový laborant provedl větší množství prvotních testů jen pro zjištění podmínek pro správné válcování. Autor této práce si myslí, že optimálních parametrů pro válcování u této zkoušky dosáhl až při provádění posledních vzorků, což bude důvod, kvůli kterému měly výsledky danou podobu.

Díky výsledkům této práce se daly stanovit tyto hlavní závěry:

- Čím větší obsah písku v zemině, tím menší je vlhkost na mezi plasticity této zeminy
- Pomocí ohybové zkoušky lze určit doplňující meze BL a SSL
- Doplňující meze u zemin také klesají s přidáváním písku do vzorku
- Vztah mezi PL(ČSN) a PL(oh.test) je vzorec: $1,0356 \times x - 1,2147$, což vychází jako pěkná shoda s přímkou 1:1 a také s přímkou podle Shimobeho
- Výsledky podle ohybového testu se blíží výsledkům podle normové metody, a také se blíží k výsledkům dle Shimobeho

- Výsledky podle ohybového testu mají globálně klesající tendenci, ovšem při porovnání vzorků mají tendenci klesající i rostoucí, což je zapříčiněno nedostatečnými zkušenostmi s touto metodou
- I při omezení lidského faktoru při použití ohybového testu nebylo možné eliminovat všechny chyby spojené s prováděním zkoušky
- Autor práce má malé zkušenosti s oběma metodami, po provedení zkoušek se přiklání k názoru, že se lépe prováděla metoda normová

Výsledky získané v této práci nebyly statisticky vyhodnoceny, a proto mají omezenou informační hodnotu. Větší množství zkoušek a zemin by bylo potřeba pro přesnější výsledky stanovených mezí a doplňujících stavů.

Chtěl bych tímto poděkovat paní Ing. Barbaře Luňáčkové, Ph.D. za její odborné vedení, poskytování užitečných rad, materiálových podkladů a pomoc při realizaci této bakalářské práce.

6. Literatura

- (1) ŠIMEK, Jiří. *Mechanika zemin*. Praha: SNTL, 1990. ISBN 80-030-0428-4.
- (2) ČSN EN ISO 17892-12: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 12: Stanovení meze tekutosti a meze plasticity*. 1 vyd. Brusel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- (3) ČSN EN ISO 17892-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 1: Stanovení vlhkosti*. 1 vyd. Brusel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- (4) WHYTE, I.L. Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion. *Ground engineering*. EMAP CONSTRUCT LIMITED, 1982, **15**(1), 16-20.
- (5) TEMYINGYONG, A., K. CHANTAWARAGUL a P. SUDASNA-NA-AYUDTHYA. Statistical analysis of influenced factors affecting the plastic limit of soils. *Kasetsart J.* 2002, (36), 98–102.
- (6) BARNES, G. E. An apparatus for the plastic limit and workability of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 2009, **162**(3), 175-185. DOI: 10.1680/geng.2009.162.3.175. ISSN 1353-2618. Dostupné také z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geng.2009.162.3.175>
- (7) MORENO-MAROTO, José a Jacinto ALONSO-AZCÁRATE. An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test. *Applied Clay Science* [online]. 2015, **114**, 497-508 [cit. 2019-10-21]. DOI: 10.1016/j.clay.2015.06.037. ISSN 01691317. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016913171530020X>
- (8) HARISON, J. A. Using the BS cone penetrometer for the determination of the plastic limit of soils. *Géotechnique*. 1988, **38**(3), 433-438.
- (9) SKEMPTION, A. W. a R. D. NORTHEY. The Sensitivity of Clays. *Géotechnique*. 1952, **3**(1), 30-53. DOI: 10.1680/geot.1952.3.1.30. ISSN 0016-8505. Dostupné také z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1952.3.1.30>
- (10) WROTH, C. P. a D. M. WOOD. The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*. 1978, **15**(2), 137-145. DOI: 10.1139/t78-014. ISSN 0008-3674. Dostupné také z: <http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/t78-014>
- (11) HANSBO, Sven. *New approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test*. No. 14. Stockholm: Swedish Geotechnical Institute, 1957. ISBN 0081-5705.
- (12) ABBECHÉ, K., O. BAHLOUL, T. AYADAT a A. BAHLOUL. Treatment of Collapsible Soils by Salts Using the Double Consolidation Method. *Experimental and applied modeling of unsaturated soils: proceedings of sessions of GeoShanghai 2010, June 3-5, 2010, Shanghai, China*. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers, 2010, s. 69-78. Geotechnical special publication, no. 202. ISBN 978-0-7844-1103-2.

- (13) CHEGENIZADEH, Amin a Hamid NIKRAZ. Shear Test on Reinforced Clay. GUANGFAN, Li, Huang YONG a Chen CHAOHE. *Advanced Building Materials*. China. Trans Tech Publications Ltd, 2011, s. 3223-3227. ISBN 978-3-03785-127-2.
- (14) BRANDON, Thomas L. a Richard J. VALENTINE. *Geotechnical Frontiers 2017 - Geotechnical Materials, Modeling, and Testing: Selected Papers from Sessions of Geotechnical Frontiers 2017, March 12-15, 2017, Orlando, Florida*. 1st. Orlando, 2017. ISBN 978-0-7844-8047-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGFGMMTS6/geotechnical-frontiers/geotechnical-frontiers>
- (15) SRIDHARAN, A., S. M. RAO a N. S. MURTHY. Liquid limit of kaolinitic soils. *Géotechnique*. 1988, **38**(2), 191-198. DOI: 10.1680/geot.1988.38.2.191. ISSN 0016-8505. Dostupné také z: <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1988.38.2.191>
- (16) WHITE, W. Arthur. Atterberg plastic limits of clay minerals. *American Mineralogist*. 1949, **34**(7-8), 508-512.
- (17) ČSN EN ISO 17892-4: *Geotechnický průzkum a zkoušení - Laboratorní zkoušky zemin - Část 4: Stanovení zrnitosti*. 1 vyd. Brusel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- (18) SHIMOBÉ, Satoru a Giovanni SPAGNOLI. A global database considering Atterberg limits with the Casagrande and fall-cone tests. *Engineering Geology*. 2019, **260**. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105201. ISSN 00137952. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795219305873>